



HAL
open science

**Utilisation de l'intelligence artificielle pour
l'identification de vecteurs d'intérêt médical et
vétérinaire: application à la reconnaissance d'Aedes
albopictus, d'Aedes aegypti et de Phlebotomus
perniciosus**

Juliette Vocanson

► **To cite this version:**

Juliette Vocanson. Utilisation de l'intelligence artificielle pour l'identification de vecteurs d'intérêt médical et vétérinaire: application à la reconnaissance d'Aedes albopictus, d'Aedes aegypti et de Phlebotomus perniciosus. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-04009981

HAL Id: dumas-04009981

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04009981>

Submitted on 1 Mar 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.

**UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR
L'IDENTIFICATION DE VECTEURS D'INTERET
MEDICAL ET VETERINAIRE :
APPLICATION A LA RECONNAISSANCE *D'AEDES
ALBOPICTUS, D'AEDES AEGYPTI* ET DE
*PHLEBOTOMUS PERNICIOSUS***

THESE D'EXERCICE

pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

VOCANSON Juliette, Elisabeth, Françoise

Directrice de thèse : Mme Emilie BOUHSIRA

JURY

PRESIDENTE :
Mme Peggy GANDIA

Professeure à l'Université Paul Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
Mme Emilie BOUHSIRA
M. Didier CONCORDET

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Liste des directeurs/assesseurs de thèse de doctorat vétérinaire

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie, thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et industrie des aliments d'origine animale*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, statistiques, modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la reproduction, endocrinologie*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie médicale animale et comparée*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des ruminants*

PROFESSEURS 2^{ème} CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, imagerie médicale*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et économie de la santé animale*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la reproduction*
- Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale*

Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BRET Lydie**, *Physique et chimie biologiques et médicales*
Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie, imagerie médicale*
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie, bactériologie, pathologie infectieuse*
Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et industrie des aliments*
M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et industrie des aliments*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie, analgésie*
M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des équidés*
Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire, maladies animales règlementées*
Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*
Mme **PALIERNE Sophie**, *Pathologie chirurgicale*
M. **GAIDE Nicolas**, *Anatomie Pathologique*

INGENIEURS DE RECHERCHE

M. **AUMANN Marcel**, *Urgences, soins intensifs*
M. **AUVRAY Frédéric**, *Santé digestive, pathogénie et commensalisme des entérobactéries*
M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie des ruminants*
M. **CROVILLE Guillaume**, *Virologie et génomique cliniques*
Mme **DEBREUQUE Maud**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
Mme **DIDIER Caroline**, *Anesthésie, analgésie*
Mme **DUPOUY GUIRAUTE Véronique**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
Mme **GAILLARD Elodie**, *Urgences, soins intensifs*
Mme **GEFFRE Anne**, *Biologie médicale animale et comparée*
Mme **GRISEZ Christelle**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
Mme **JEUNESSE Elisabeth**, *Bonnes pratiques de laboratoire*
Mme **PRESSANTI Charline**, *Dermatologie vétérinaire*
M. **RAMON PORTUGAL Félipe**, *Innovations thérapeutiques et résistances*
M. **REYNOLDS Brice**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
Mme **ROUCH BUCK Pétra**, *Médecine préventive*
M. **DELPONT Mattias**, *Clinique Aviaire*
Mme **POUJADE Agnès**, *Anatomie pathologique Vétérinaire*
Mme **LAYSSOL-LAMOUR Catherine**, *Imagerie Médicale*
Mme **SAADA Chloé**, *Gestion intégrée de la santé des ruminants*

A Madame la Professeure Peggy Gandia,

Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse et Responsable du Laboratoire de Pharmacocinétique et Toxicologie Institut Fédératif de Biologie CHU Purpan.

Merci d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

A Madame la Docteure Émilie Bouhsira,

Maître de conférences en Parasitologie et Maladies Parasitaires à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Merci d'avoir accepté le rôle de directrice de thèse. Merci pour votre accompagnement et votre précieuse aide dans la réalisation de cette thèse. Merci par ailleurs pour vos enseignements en Parasitologie.

A Monsieur le Professeur Didier Concordet,

Professeur en Mathématiques, Statistiques et Modélisation à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Merci d'avoir accepté de faire partie de mon jury ainsi que de votre aide et disponibilité pour la réalisation de ce travail de thèse. Merci également pour vos enseignements en Biostatistiques.

A Monsieur le Docteur Henry Brunet,

Docteur en Mathématique appliqué.

Merci pour ton aide précieuse, ta disponibilité, ta patience et ton accompagnement au cours de la réalisation de ce projet.

A Monsieur Louis Marquis,

Ingénieur en intégration logiciel chez Renault Software Factory.

Merci du soutien sans faille dont tu as fait preuve à mon égard pendant l'ensemble de la réalisation de ce travail de thèse. Merci également pour ta pédagogie et le partage de tes connaissances en informatique.

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	6
TABLE DES ILLUSTRATIONS	9
INTRODUCTION	12
PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR TROIS VECTEURS D'INTÉRÊT MÉDICAL ET VÉTÉRINAIRE	14
A. <i>Aedes aegypti</i> et <i>Aedes albopictus</i>	14
1. Taxonomie	14
2. Historique	15
a. Le genre <i>Aedes</i>	15
b. L'espèce <i>Aedes aegypti</i>	16
c. L'espèce <i>Aedes albopictus</i>	17
3. Morphologie comparative des individus adultes d' <i>Aedes aegypti</i> et d' <i>Aedes albopictus</i>	17
a. Présentation des méthodes d'identification	17
b. Caractéristiques communes aux adultes des deux espèces	18
c. Caractéristiques spécifiques d' <i>Aedes aegypti</i>	24
d. Caractéristiques spécifiques d' <i>Aedes albopictus</i>	26
4. Cycle de vie	27
a. Synthèse sur le cycle de vie des moustiques du genre <i>Aedes</i>	27
b. Influence de la température sur le cycle de développement	30
c. Préférence trophique	31
5. Distribution géographique d' <i>Aedes aegypti</i> et d' <i>Aedes albopictus</i>	31
a. Extension géographique d' <i>Aedes aegypti</i>	32
b. Extension géographique d' <i>Aedes albopictus</i>	33
c. Capacité d'adaptation d' <i>Aedes albopictus</i>	35
6. Compétences vectorielles de ces deux espèces	37
B. <i>Phlebotomus perniciosus</i>	37
1. Taxonomie	38
2. Historique	40
3. Morphologie des adultes	40
4. Bio-écologie de <i>Phlebotomus perniciosus</i>	43
a. Habitat	43
b. Cycle de vie	44
c. Comportement hématophage	46
5. Distribution géographique	47
6. Compétences vectorielles	49
a. Vecteur de leishmanies	49
i. Étiologie	49
ii. Épidémiologie	50
b. Vecteurs d'arbovirus	51
PARTIE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	52
A. Généralités sur l'intelligence artificielle	52
1. Une pluralité de définitions	52
2. L'histoire de l'intelligence artificielle	52
3. Les domaines d'exploitation de l'intelligence artificielle	54

B. L'apprentissage automatique	54
1. Définition	54
2. Les différents algorithmes de classification	55
a. L'algorithme d'apprentissage	55
b. Les méthodes supervisées	55
c. Les méthodes non supervisées	56
C. L'apprentissage profond	56
1. Définition	56
2. Les différents type de réseaux de neurones	58
a. Les réseaux de neurones artificiels	58
b. Définition d'un neurone formel	58
c. Les réseaux de neurones multi-couches	59
d. Les réseaux de neurones convolutifs	60
e. Les réseaux de neurones récurrents	61
3. Application à la reconnaissance d'images	61
a. Caractéristiques numérique d'une image	61
b. Réseau de neurones adaptés	62
c. Entraînement à la reconnaissance d'images	63
i. La base de données	63
ii. L'apprentissage	63
PARTIE III : UTILISATION DE L'APPRENTISSAGE PROFOND DANS LA RECONNAISSANCE DE TROIS VECTEURS D'INTÉRÊT MÉDICAL ET VÉTÉRINAIRE	65
A. Création de la base de données photos	65
1. Matériel	65
a. Souches et espèces de moustiques et de phlébotomes utilisées	65
b. Environnement de prise des clichés	66
c. Appareil photo utilisé	67
2. Méthode	68
a. Durée de la constitution de la base de données	68
b. Paramètres environnementaux de la prise des clichés	68
c. Paramètres photographiques utilisés	68
d. Gestion des individus photographiés	70
3. Résultats	71
a. Nombre de photos réalisées	71
b. Aperçu des clichés	72
B. Mise en forme des données	73
1. Conversion vers un format « .png »	74
2. Labellisation des données	74
a. Le logiciel Labellmg®	74
b. Méthode	75
c. Exemple d'images labellisées	76
d. Création de fichiers de format « .xml »	77
3. Création de fichiers « .csv »	78
a. Méthode	78
b. Format des données	79
4. Création de fichiers « .record »	80
C. Lancement de l'apprentissage et du test du réseau de neurones	81
1. Matériel	81
a. Utilisation de l'interface Google Drive®	81
b. Utilisation de l'environnement Colaboratory®	81
c. Utilisation du réseau de neurones « Faster R-CNN »	82
2. Méthode	84
a. Choix des paramètres d'entraînements	84
b. Programme utilisé	85

c. Format des données obtenues en sortie	86
3. Visualisation de l'avancé de l'apprentissage	87
a. TensorBoard	87
b. Exemple de graphiques obtenus	88
4. Export du graphique d'inférence	89
a. Méthode	89
b. Résultat	89
5. Test du réseau de neurones avec une image inconnue	90
a. Méthode	90
b. Résultat	91
PARTIE IV : DISCUSSION	92
A. Contexte de ce projet	92
1. La possibilité de création d'une application de reconnaissance d'insectes	92
2. Utilisation des données récoltées	93
a. En épidémiologie et santé publique	93
b. En écologie	94
c. Au sein des différentes systèmes de production agro-alimentaire	95
3. La poursuite de l'entraînement du réseau de neurones	95
B. Biais de constitution de la banque de données photographiques	96
1. Matériel de photographie	96
2. Diversité d'environnements utilisés pour la constitution de la banque de données	96
3. Utilisation d'insectes élevés en captivité	97
C. Échec de l'étape de test du réseau de neurones	98
1. Incompatibilité de la taille des images de la banque de données	98
a. Taille des images au sein de la banque de données	98
b. Erreur dans la conception des fichier CSV	99
2. Erreur au cours de l'entraînement du réseau de neurones	99
a. Choix des paramètres de l'entraînement	99
b. Erreur lors de l'exécution du programme « train.py »	100
CONCLUSION	101
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	103

Table des illustrations

- Figure 1 : Taxonomie du sous-genre *Stegomyia* (schéma original) 15
- Figure 2 : Tête d'un mâle (à gauche) et d'une femelle (à droite) adultes de l'espèce *Aedes albopictus* (schéma original à partir de photographies de Eric Stavale Biologist, U.S. Department of Health and Human Services Biomedical Advanced Research and Development Authority). 19
- Figure 3 : Tête d'une femelle *Aedes aegypti* (schéma original à partir d'une photographie Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 19
- Figure 4 : Vue dorsale du thorax des espèces *Aedes albopictus* (à gauche) et *Aedes aegypti* (à droite) (Le Goff, Brengues, Robert 2013). 20
- Figure 5 : Aile droite de femelle *Aedes aegypti* avec la position des repères communs aux deux espèces *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* (en blanc) et la position des repères permettant de différencier ces deux espèces (en noir). (Stephens, Juliano 2012). 21
- Figure 6 : Différents segments composant une patte postérieure d'un individu *Aedes* (schéma original à partir d'une photographie de Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 22
- Figure 7 : Aspect des griffes de la paire de patte antérieure chez le mâle (1) et la femelle (2), de la paire de patte médiane chez le mâle (3) et la femelle (4) et de la paire de patte postérieure chez le mâle (5) et la femelle (6) de l'espèce *Aedes aegypti* au microscope grossissement x160. (Andrew, Bar 2013). 23
- Figure 8 : Aspect de l'abdomen d'une femelle *Aedes aegypti* (à gauche) et *Aedes albopictus* (à droite) (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 24
- Figure 9 : Photographie d'un individu femelle de l'espèce *Aedes aegypti* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 25
- Figure 10 : Photographie d'un individu mâle de l'espèce *Aedes aegypti* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 25
- Figure 11 : Photographie d'un individu femelle *Aedes albopictus* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 26
- Figure 12 : Photographie d'un individu mâle *Aedes albopictus* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)). 27
- Figure 13 : Cycle biologique du genre *Aedes* (schéma original réalisé sur BioRender.com) 28
- Figure 14 : Morphologie d'œufs *Aedes aegypti* (Mundim-Pombo et al. 2021) 29
- Figure 15 : Répartition mondiale des espèces *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* (Houé, Bonizzoni, Failloux 2019) 32
- Figure 16 : Répartition d'*Aedes aegypti* en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control) 33

Figure 17 : Répartition d' <i>Aedes albopictus</i> en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control)	34
Figure 18 : Répartition géographique d' <i>Aedes albopictus</i> en 2004, 2012 et 2021. Les départements où <i>Aedes albopictus</i> est présent sont en rouge. (Ministère de la Santé et de la prévention)	35
Figure 19 : Taxonomie du sous-genre <i>Larrousius</i> (schéma original)	38
Figure 20 : Schéma de l'appareil génital des femelles <i>Phlebotomus perniciosus</i> (A), de leur spermathèques (B) et de l'aspect des réservoirs situés en partie sub-terminale de l'appareil génital (C). (Benallal et al. 2022; Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014)	39
Figure 21 : Aspect du pharynx des femelles de l'espèce <i>Phlebotomus perniciosus</i> (Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014).	39
Figure 22 : Schéma de l'appareil génital mâle chez les espèces <i>Phlebotomus sergenti</i> (A), <i>papatesi</i> (B), <i>perniciosus</i> (C) et <i>ariasii</i> (D) appartenant au sous-genre <i>Larrousius</i> (Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014).	40
Figure 23 : Phlébotome femelle de l'espèce <i>Phlebotomus perniciosus</i> (Prudhomme 2015)	41
Figure 24 : Schéma du thorax d'un phlébotome adulte (Galati et al. 2017)	42
Figure 25 : Morphologie d'un phlébotome adulte (a) Imago femelle ; (b) Derniers segments abdominaux d'un imago mâle (Lane 1993).	43
Figure 26 : Exemple d'habitat de <i>Phlebotomus perniciosus</i> à Ticino en Suisse (Prudhomme 2015)	44
Figure 27 : Cycle de vie du phlébotome (schéma original réalisé sur Biorender.com)	46
Figure 28 : Distribution mondiale des principaux genres de phlébotomes (Depaquit, Léger 2017)	47
Figure 29 : Répartition de <i>Phlebotomus perniciosus</i> en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control)	49
Figure 30 : Différence entre l'apprentissage automatique classique (à droite) et l'apprentissage profond (à gauche). La zone bleutée correspond à la zone d'apprentissage (Hardy 2019.)	57
Figure 31 : Exemple de représentation d'un réseau de neurones multi-couches (Hardy 2019)	59
Figure 32 : Architecture globale d'un réseau de neurones convolutive (Alom et al. 2019)	60
Figure 33 : Cage utilisée pour photographier les moustiques du genre <i>Aedes</i> (Photographies originales).	67
Figure 34 : Paramètres photographiques des clichés réalisés.	70
Figure 35 : Tableau descriptif des lots d'individus utilisés pour la réalisation des photographies composant la banque de données.	71

<i>Figure 36 : Tableau présentant le nombre de photographies d'individus mâles et femelles de chaque espèce par lot.</i>	72
<i>Figure 37 : Photographies des différents individus avec en a) une femelle Phlebotomus perniciosus, en b) un mâle Phlebotomus perniciosus, en c) une femelle Aedes aegypti, en d) un mâle Aedes aegypti, en e) une femelle Aedes albopictus et en f) un mâle Aedes albopictus (photographies originales).</i>	73
<i>Figure 38 : Tableau des labels utilisés pour chaque catégorie d'individus.</i>	75
<i>Figure 39 : Aperçu de l'interface du logiciel Labellmg (Photographie originale).</i>	76
<i>Figure 40 : Photographies labellisées des différents individus avec en a) une femelle Phlebotomus perniciosus, en b) un mâle Phlebotomus perniciosus, en c) une femelle Aedes aegypti, en d) un mâle Aedes aegypti, en e) une femelle Aedes albopictus et en f) un mâle Aedes albopictus (Photographies originales).</i>	77
<i>Figure 41 : Organisation d'un fichier XML (Photographie originale).</i>	78
<i>Figure 42 : Extrait du fichier "test_labels.csv" (Photographie originale).</i>	80
<i>Figure 43 : Schéma d'organisation du réseau de détection Faster R-CNN : le RPN pour les propositions de régions et Fast R-CNN en tant que détecteur (source : https://towardsdatascience.com/faster-r-cnn-for-object-detection-a-technical-summary-474c5b857b46).</i>	84
<i>Figure 44 : Extrait de l'apprentissage du réseau de neurones Faster R-CNN en cours (Photographie originale).</i>	86
<i>Figure 45 : Interface TensorBoard sur Collaboratory avec comme exemple le graphique du taux d'apprentissage en fonction de l'avancé de l'entraînement (Photographie originale).</i>	87
<i>Figure 46 : Graphique de la fonction de perte propre au RPN concernant la classification (à gauche) et la localisation (à droite) (Photographie originale).</i>	88
<i>Figure 47 : Graphique de la fonction de perte propre au détecteur Fast R-CNN concernant la classification (à gauche) et la localisation (à droite) (Photographie originale).</i>	88
<i>Figure 48 : Graphique de la fonction de perte globale du modèle (Photographie originale).</i>	89

Introduction

Les moustiques et phlébotomes sont des insectes vecteurs d'une multitude d'agents pathogènes pouvant être à l'origine de maladies chez les humains et les animaux. Parmi ces insectes, trois espèces se distinguent par leur importance en santé publique en raison de la gravité des maladies causées par les agents pathogènes qu'elles peuvent transmettre : il s'agit des moustiques *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* et du phlébotome *Phlebotomus perniciosus* (Medlock et al. 2012; Depaquit et al. 2010).

La technologie de l'intelligence artificielle et plus particulièrement le domaine de la classification automatique de photographies s'est avéré être utile dans l'étude et le suivi de ces espèces vectrices (Park et al. 2020; Ong et al. 2021). En effet, l'identification des espèces trouvées dans une zone géographique donnée permet de définir le risque vectoriel associé et d'orienter le choix des mesures de lutte, dans le but de prévenir la transmission d'agents pathogènes. Les outils de reconnaissance de ces espèces vectrices, faisant appel à l'apprentissage profond, mis au point par les précédentes études s'appuient sur des banques de données photographiques regroupant des clichés d'individus morts et dans des positions prédéfinies (Ong et al. 2021; Park et al. 2020). Une unique étude (Okayasu et al. 2019) se sert de clichés de moustiques dans des positions physiologiques car encore vivants. De plus, les banques de données photographiques jusqu'alors constituées comprenaient au maximum 14 400 clichés (Okayasu et al. 2019). Bien que les résultats de ces études se soient montrés probants dans la capacité de reconnaissance de différentes espèces d'insectes par un programme informatique (Okayasu et al. 2019; Ong et al. 2021; Park et al. 2020), l'utilisation de photographies d'individus vivants prises par un Smartphone afin d'entraîner un réseau de neurones n'a encore jamais été réalisée.

Ce travail s'inscrit dans le projet de la création d'une application capable d'identifier l'espèce et le sexe d'un insecte à partir d'une photographie prise avec un Smartphone. Il a consisté dans un premier temps en la construction d'une banque de donnée comportant plus de 60 000 images d'individus vivants des trois espèces étudiées : *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus* et *Phlebotomus perniciosus*. Puis, ces ressources photographiques ont été mises en forme afin de servir de supports d'apprentissage à un réseau de neurones informatique. Le but de ce travail est

d'évaluer la possibilité de reconnaissance des différentes espèces sélectionnées par un programme d'intelligence artificielle préalablement entraîné.

Les applications d'un tel programme seraient multiples. En effet, cette intelligence artificielle sous la forme d'application permettrait la construction d'une base de données évoluant en temps réel ainsi que son utilisation par le grand public, ce qui permettrait de suivre l'évolution de la répartition géographique des espèces vectrices, et notamment leur introduction dans des zones encore non endémiques.

Partie I : Synthèse bibliographique sur trois vecteurs d'intérêt médical et vétérinaire

A. *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus*

Les moustiques sont des insectes vecteurs qui transmettent le plus d'agents pathogènes à l'Homme, tels que : des parasites intracellulaires du genre *Plasmodium* à l'origine notamment du paludisme, de nombreux virus appelés arbovirus (« arthropod-borne viruses »), ainsi que de filaires. Parmi la famille des *Culicidae*, regroupant les moustiques, on distingue 41 genres dont le genre *Aedes* (Foster, Walker 2019). Ce dernier comprend 263 espèces réparties en 21 sous-genres dont de nombreuses espèces vectrices (Harbach, Ralph E. 2007). Parmi ces espèces, *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* se démarquent par leur importance en santé publique et animale (Rattanarithikul et al. 2010).

1. Taxonomie

Les espèces du genre *Aedes* sont des Arthropodes, Insectes, Diptères, Nématocères de la famille des Culicidés.

Les moustiques appartiennent à l'embranchement des Arthropodes qui regroupe quatre classes : les Insectes, les Crustacés, les Arachnides et les Myriapodes ; ayant pour caractéristiques communes la présence d'appendices locomoteurs articulés ainsi qu'un corps segmenté revêtu d'une substance rigide appelée exosquelette.

Les insectes adultes se caractérisent par un corps divisé en trois parties distinctes : la tête, le thorax et l'abdomen ; trois paires d'appendices locomoteurs ainsi que deux antennes.

L'ordre des Diptères regroupe des insectes caractérisés par une unique paire d'ailes membraneuses ainsi qu'une deuxième paire modifiée et réduite pour former un balancier. Les diptères possèdent également un appareil buccal adapté à leur régime alimentaire.

Les espèces appartenant au sous-ordre des Nématocères présentent une paire d'antennes filiformes composée chacune de plus de trois segments.

La famille des *Culicidae* regroupe les moustiques, soit environ 3600 espèces réparties en trois sous-familles que sont les *Anophelinae*, les *Taxorynchinae* et les *Culicinae*, à laquelle le genre *Aedes* appartient (Harbach, Kitching 1998; Fall 2013; Wilkerson et al. 2015).

Le genre *Aedes* fait partie de la tribu *Aedini* créée en 1902 par Neveu-Lemaire afin de clarifier la classification au sein de la sous-famille des *Culicinae* (Neveu-Lemaire 1923). Cette tribu, qui regroupe plus de 1200 espèces, est la plus grande parmi les 11 tribus qui composent la sous-famille des *Culicinae* (Wilkerson et al. 2015).

Le genre *Aedes* est divisé en différents sous-genres dont le sous-genre *Stegomyia*. Ce dernier regroupe 130 espèces dont les deux plus importantes sont *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* de par leur répartition mondiale et leur rôle vectoriel majeur (Rattanaarithikul et al. 2010).

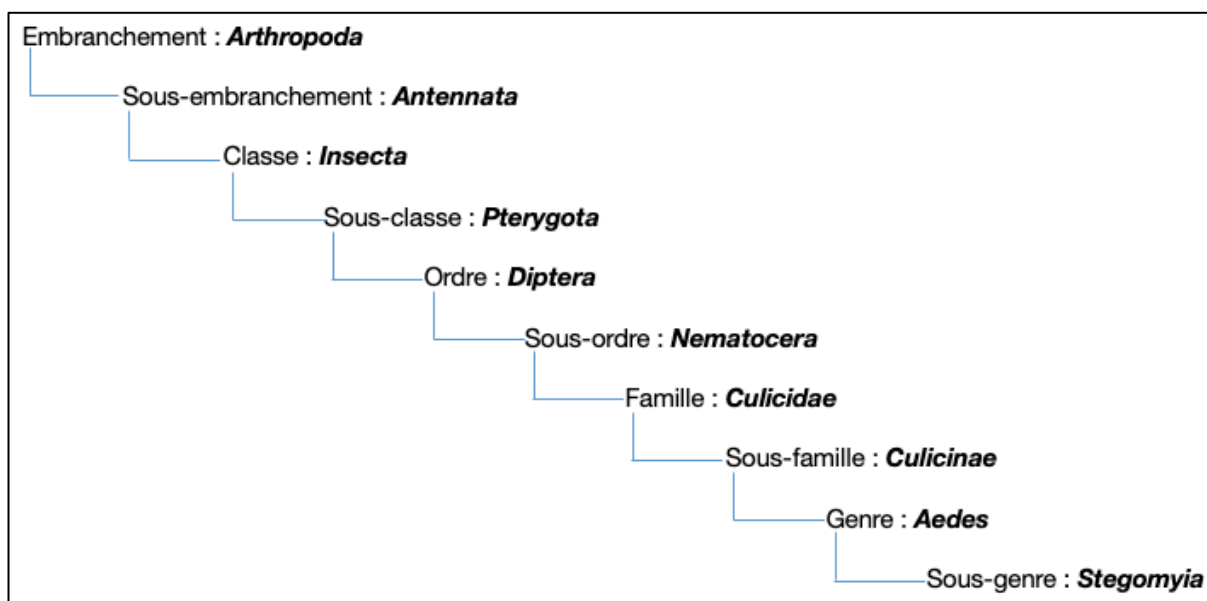


Figure 1 : Taxonomie du sous-genre *Stegomyia* (schéma original)

2. Historique

a. Le genre *Aedes*

Le nom *Aedes* provient du grec ancien « ἀειδής » soit aeidês, signifiant « déplaisant » ou « dégoûtant ». C'est en 1818 en Allemagne, que l'entomologiste

Johann Wilhem Meigen décrit pour la première fois le genre *Aedes* qui regroupe les *Culicidae* munis de pièces buccales sensorielles, appelées palpes, longues dans les deux sexes ainsi que d'antennes plumeuses chez les mâles et glabres chez les femelles (Meigen 1869; Neveu-Lemaire 1923).

Au cours des siècles suivants, suite à l'inclusion de nombreuses espèces très diverses, une grande hétérogénéité s'est développée au sein de ce genre. En effet, le genre *Aedes* est souvent défini par l'absence de caractères plutôt que par leur présence d'après l'entomologiste américain John N. Belkin (Belkin 1962). A partir des années 1950, des entomologistes du monde entier travaillent afin de proposer une révision de la classification des *Culicidae* et notamment du genre *Aedes*.

Une nouvelle classification basée sur les caractéristiques des organes sexuels est proposée par John Reinert en 2000. Elle s'appuie également sur les caractéristiques morphologiques des larves au stade quatre. De ce fait, de nombreuses espèces du genre *Aedes* sont reclassées dans le genre *Ochlerotatus* appartenant à la tribu *Aedini* tout comme le genre *Aedes*. Il s'agit donc de 263 espèces réparties en 23 sous-genres qui sont comprises au sein du genre *Aedes* selon cette classification qui repose sur une analyse essentiellement morphologique (Reinert 2000).

Au début du XXI^{ème} siècle, de nouvelles classifications, faisant appel à des études phylogénétiques, ont été proposées. Selon ces études, les espèces *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* seraient à considérer comme appartenant au genre *Stegomyia* (Reinert, Harbach, Kitching 2004). Cette appellation est plus communément utilisée comme un sous-genre. Cependant, aucun consensus n'est établi au sein de la communauté scientifique et cette dénomination est peu utilisée (Polaszek 2006).

b. L'espèce *Aedes aegypti*

En 1757, lors d'un voyage au Proche-Orient, les naturalistes suédois F. Hasselquist et C. von Linnée sont les premiers à décrire l'espèce *Aedes aegypti* (Hasselquist 1757). Cette espèce a tout d'abord été nommée *Culex aegypti* car *Culex* était le nom générique donné aux moustiques avant la formalisation des classifications et la création des différents genres comme *Aedes*. En 1900, *Aedes aegypti* a été identifié comme vecteur du virus de la fièvre jaune (Tabachnick 1991).

Cette découverte en parallèle de la mise en évidence du rôle de vecteur d'autres espèces de moustiques a donné naissance à l'intérêt pour l'entomologie médicale. Par la suite, la compétence vectorielle d'*Aedes aegypti* a été mise en évidence pour d'autres arbovirus d'intérêt majeur en santé publique.

c. L'espèce *Aedes albopictus*

C'est dans le golfe du Bengale, en 1894, que l'espèce, d'abord nommé *Culex albopictus* avant d'être classée dans le genre *Aedes*, a été découverte par l'entomologiste anglo-australien F.A.A Skuse (Skuse 1899). Avec la multiplication des échanges commerciaux à partir des années 1960, *Aedes albopictus* a été introduit sur tous les continents (Reiter 1998). Il est aujourd'hui devenu prépondérant dans de nombreuses zones du globe où il a pu s'adapter à des conditions climatiques très variables grâce à sa plasticité phénotypique (Kraemer et al. 2015).

3. Morphologie comparative des individus adultes d'*Aedes aegypti* et d'*Aedes albopictus*

a. Présentation des méthodes d'identification

Les caractéristiques morphologiques permettant de différencier ces deux espèces ont été mise en évidence sur la forme adulte des individus femelles ou sur le stade larvaire 4. L'étude de la morphologie a été démontré comme étant la plus adaptée pour identifier l'espèce d'appartenance des individus adultes (Andrew, Bar 2013; Schaffner, Mathieu 2020).

D'autres techniques moléculaires complémentaires peuvent être réalisées afin d'identifier des individus d'un autre stade ou bien en mauvais état. Il s'agit de la PCR multiplex, du séquençage après réalisation d'une PCR, de l'amplification isotherme LAMP et de la spectrométrie de masse Maldi-TOF (Schaffner, Mathieu 2020). L'étude de la morphométrie géométrique des ailes semble une méthode fiable permettant d'identifier les individus des différentes espèces mais également leur sexe. Cependant ce critère peut varier en fonction de l'origine géographique des individus (Stephens, Juliano 2012; Wilke et al. 2016; Chaiphongpachara, Laojun 2019).

L'utilisation de la microscopie à balayage afin de différencier les œufs des deux espèces est une méthode qui s'est également montrée efficace (Suman et al. 2011).

b. Caractéristiques communes aux adultes des deux espèces

La plupart des clés d'identification des moustiques du genre *Aedes* sont exclusivement basées sur les caractéristiques des individus femelles alors que très peu prennent en compte la morphologie des individus mâles (Patsoula et al. 2006).

Les moustiques appartenant aux espèces *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* ont un corps qui mesure environ 0,5 cm (Ponlawat, Harrington 2007; Harrington, Ponlawat 2009; Schneider et al. 2004).

La tête de ces moustiques a une forme ronde et est de taille variable. Celle des femelles est plus longue que celle des mâles qui est plus large. Les individus des deux sexes possèdent des écailles plates blanches argentées au sommet de la tête qui s'étendent jusqu'à l'espace interoculaire. Ces écailles sont rondes chez les mâles et ovales chez les femelles comme visualisé sur la Figure 2 (Andrew, Bar 2013; Patsoula et al. 2006).

Les antennes sont composées d'un premier segment très réduit, appelé scape, et d'un flagelle de 13 segments, correspondant à la partie terminale de l'antenne. Les antennes des individus mâles sont plus longues et possèdent des soies densément disposées en verticille, c'est-à-dire que plusieurs soies sont insérées au même niveau et disposés en cercle autour de l'axe de l'antenne et ce motif est répété sur toute la longueur du flagelle. Les femelles possèdent des antennes plus courtes et glabres (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001). La présence d'écailles blanches à la base du pédicelle des antennes (Figure 2) est une caractéristique des individus du sous-genre *Stegomyia* (Fall 2013).

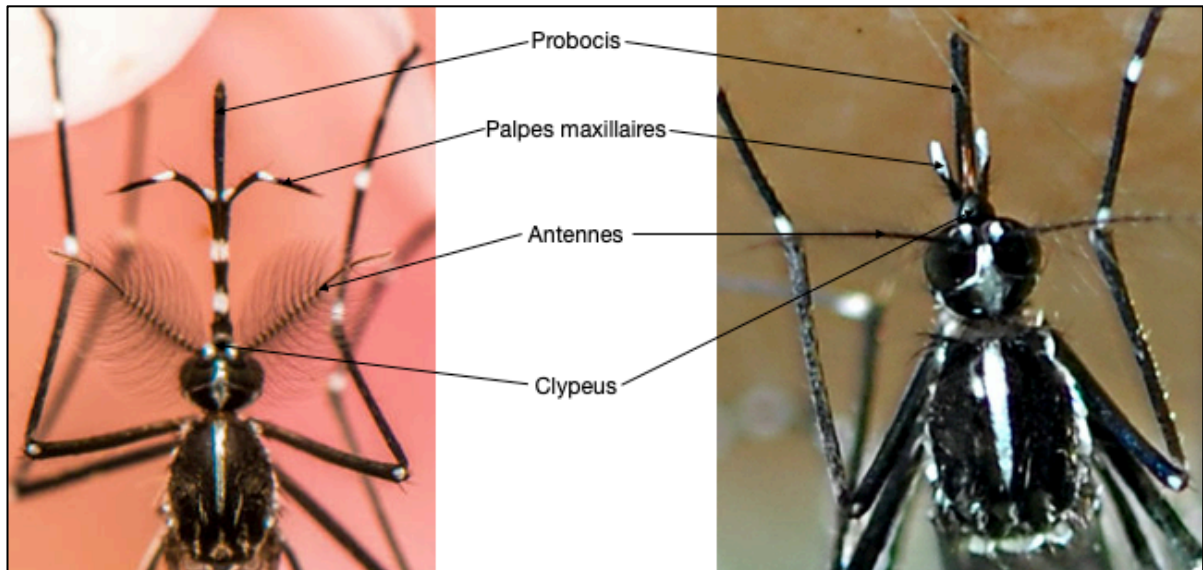


Figure 2 : Tête d'un mâle (à gauche) et d'une femelle (à droite) adultes de l'espèce *Aedes albopictus* (schéma original à partir de photographies de Eric Stavale Biologist, U.S. Department of Health and Human Services Biomedical Advanced Research and Development Authority).

Ces espèces présentent un proboscis foncé, long et fin. Celui des mâles est plus court que celui des femelles. La paire de palpes maxillaires est beaucoup plus longue chez le mâle et présente cinq bandes blanches. Chez la femelle, la longueur des palpes maxillaires est inférieure à un tiers de la taille du proboscis (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001). La présence d'écaillles blanches à l'apex des palpes maxillaires est une spécificité du sous-genre *Stegomyia* visible sur les Figures 2 et 3 (Fall 2013; Andrew, Bar 2013).



Figure 3 : Tête d'une femelle *Aedes aegypti* (schéma original à partir d'une photographie Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).

Les femelles possèdent un thorax plus long et large que celui des mâles (Andrew, Bar 2013). Ce thorax marron foncé à noir est orné d'un motif blanc brillant qui diffère chez les deux espèces. Le scutellum est la partie du thorax située entre les points d'insertion des ailes. Elle est composée de trois lobes comportant chacun des plages d'écailles blanches (Figure 4). Au sein du genre *Aedes* on observe l'absence de soies pré-spiraculaires et la présence de soies post-spiraculaires. Ces soies doivent leur nom à leur région d'implantation crâniale ou caudale à l'orifice présent en région latérale du thorax nommé spiracle et permettant l'entrée des gaz vers le système respiratoire (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001).



Figure 4 : Vue dorsale du thorax des espèces *Aedes albopictus* (à gauche) et *Aedes aegypti* (à droite) (Le Goff, Brengues, Robert 2013).

Les ailes des individus appartenant aux espèces *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* sont similaires. Elles sont plates et étroites. La base de l'aile est étroite alors que sa région médiane est plus large et sa partie antérieure est ovale. Elles sont composées de membranes supportées par des nervations particulières (Figure 5). Ces nervations peuvent permettre de différencier les individus des deux espèces ainsi que leur sexe de manière fiable (Wilke et al. 2016; Stephens, Juliano 2012; Chaiphongpachara, Laojun 2019). Le bord antérieur de l'aile est lisse alors que le bord postérieur est composé d'écailles bordées d'une frange. Les ailes des femelles sont plus grandes que celles des mâles (Andrew, Bar 2013; Schaffner, Mathieu 2020).

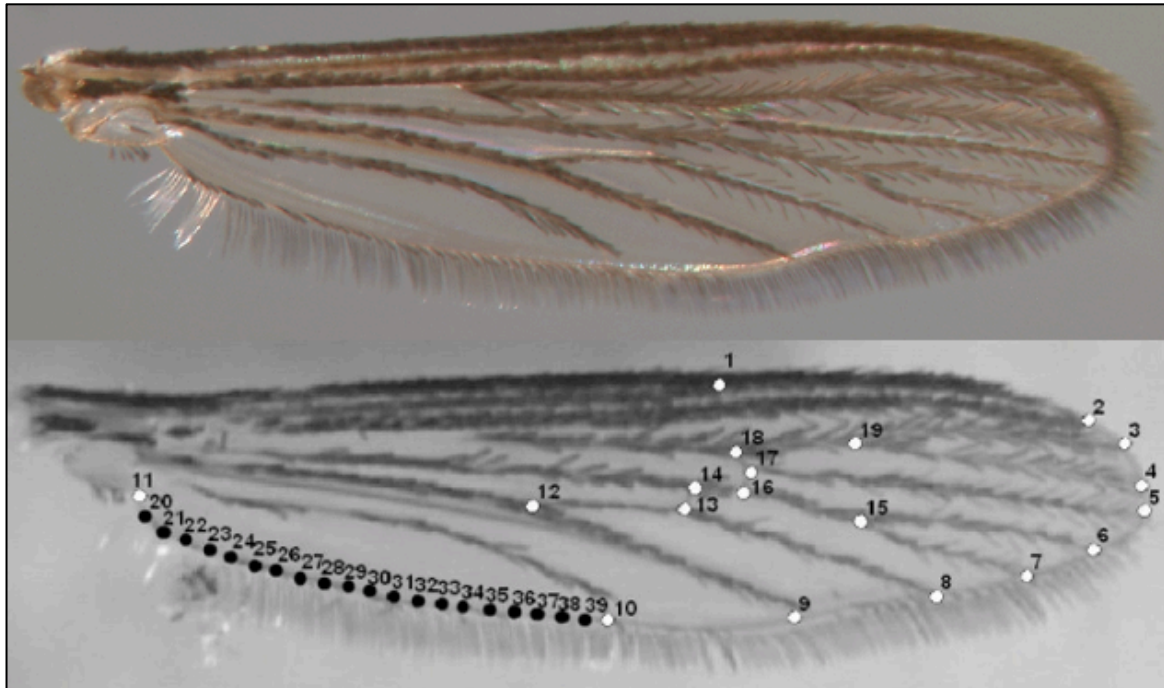


Figure 5 : Aile droite de femelle *Aedes aegypti* avec la position des repères communs aux deux espèces *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* (en blanc) et la position des repères permettant de différencier ces deux espèces (en noir). (Stephens, Juliano 2012).

Les individus possèdent trois paires de pattes qui sont composées d'un coxa, d'un trochanter, d'un fémur, d'un tibia et de segments tarsaux terminés par des griffes dentées. Le coxa, qui correspond au premier segment permettant l'articulation de la patte avec le thorax à partir de la cavité coxale, de chaque patte présente une tache blanche. Le trochanter est le deuxième segment composant la patte des insectes qui est composé de muscles permettant la rétractation du fémur. La moitié proximale du fémur des paires de pattes la plus crâniale et la plus caudale est blanche. La portion distale du fémur des différentes pattes est en forme de genou et de couleur blanche. Le tibia est cylindrique et ne présente pas de bandes blanches (Figure 6).

Le tarse est l'appendice terminal articulé au tibia de la patte des insectes. Chez les moustiques du genre *Aedes*, ce dernier est pentamère, c'est-à-dire qu'il est composé de cinq segments. Sur les deux paires de pattes les plus crânielles, les deux segments proximaux possèdent de larges bandes blanches alors qu'elles sont présentes sur les cinq segments tarsaux de la paire de patte caudale (Andrew, Bar 2013; Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001). Le segment le plus distal du tarse est toujours majoritairement voire entièrement de couleur blanche (Fall 2013; Schaffner, Mathieu 2020).

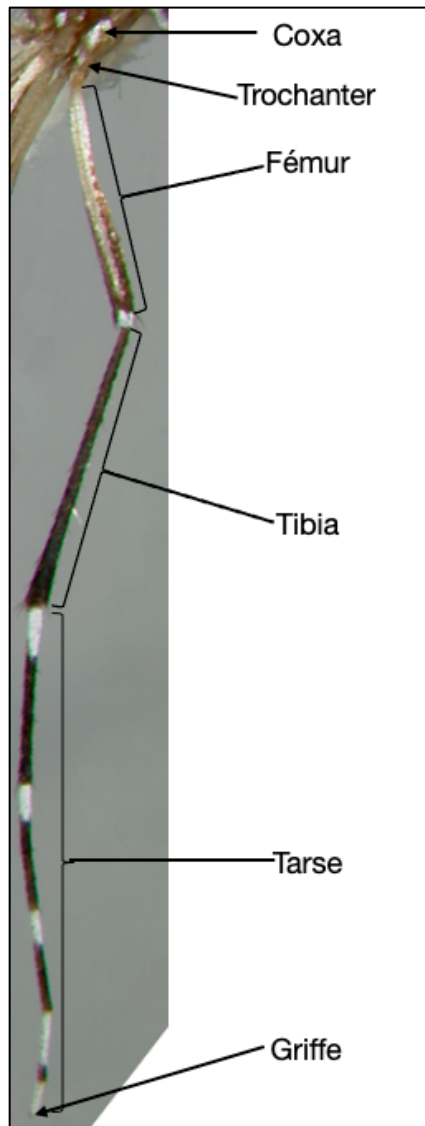


Figure 6 : Différents segments composant une patte postérieure d'un individu *Aedes* (schéma original à partir d'une photographie de Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).

Les griffes sont des organes pairs recourbés, en forme de crochet, situés à l'extrémité distale des tarse. Elles diffèrent par leur taille et leur conformation en fonction de la paire de pattes à laquelle elles appartiennent (Figure 7). Une disparité entre les griffes des individus femelles et des individus mâles a également été mise en évidence. Les pattes antérieures des individus mâles présentent une paire de griffes dont l'une possède une dent et est de taille plus importante que la deuxième qui est une griffe simple. Chez les individus femelles, les deux griffes des pattes antérieures sont munies d'une dentelure et sont de taille équivalente. La paire de patte médiane du mâle possède une paire de griffes simple avec une griffe latérale plus grande que la griffe médiale ; alors que chez la femelle, ces deux griffes présentent une dentelure. Deux petites griffes simples de taille similaire sont présentes à l'extrémité des pattes postérieures chez le mâle et la femelle (Andrew, Bar 2013).

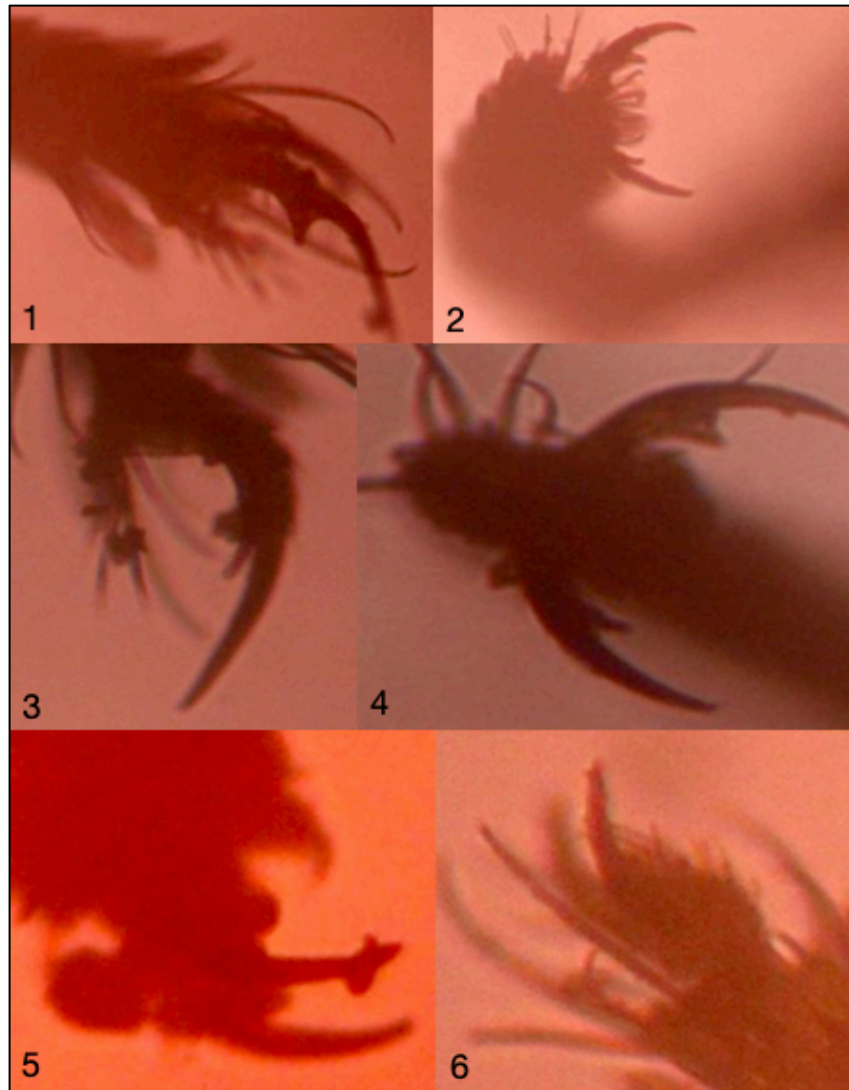


Figure 7 : Aspect des griffes de la paire de patte antérieure chez le mâle (1) et la femelle (2), de la paire de patte médiane chez le mâle (3) et la femelle (4) et de la paire de patte postérieure chez le mâle (5) et la femelle (6) de l'espèce *Aedes aegypti* au microscope grossissement x160. (Andrew, Bar 2013).

Les moustiques du genre *Aedes* sont caractérisés par un abdomen long et étroit (Patsoula et al. 2006). Il est composé de huit segments couverts d'écailles blanches et noires. Les motifs formés par ces écailles diffèrent entre les deux espèces. L'extrémité postérieure de l'abdomen est étroite chez les mâles alors qu'elle a une forme large et ronde chez les femelles comme visualisé sur la Figure 8 (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001).



Figure 8 : Aspect de l'abdomen d'une femelle *Aedes aegypti* (à gauche) et *Aedes albopictus* (à droite) (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).

c. Caractéristiques spécifiques d'*Aedes aegypti*

Le clypeus est une pièce située sur la partie inférieure de la tête des insectes recouvrant en partie les pièces buccales. Celui des individus *Ae. aegypti* est recouvert d'écailles. Celui des femelles présente deux points blanc brillants à la différence de celui des mâles qui n'en possèdent pas (Figure 3).

Le thorax présente sur sa face dorsale des écailles blanches organisées en forme de lyre. Entre ces marques, deux étroites lignes blanches médianes sont présentes. Ce motif, présenté sur la Figure 4, est caractéristique de l'espèce *Ae. aegypti* et c'est le principal critère de diagnose entre les individus de cette espèce et ceux de l'espèce *Ae. albopictus* (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001; Andrew, Bar 2013). Les griffes présentent à l'extrémité des segments tarsaux sont dentées (Patsoula et al. 2006).

Le tergite, correspondant à la partie chitineuse dorsale d'un segment du corps d'un insecte, du segment crânial de l'abdomen possède une tache blanche médiane et les six tergites suivants ont une bande blanche transverse. Des taches blanches sont présentes sur les pleurites des sept premiers segments, c'est-à-dire sur les

parties latérales de ces segments (Figures 9 et 10). Chez les mâles, deux taches blanches dorso-latérales sont présentes sur les sixième et septième segments. Le huitième segment est de taille réduite chez les femelles (Patsoula et al. 2006; Andrew, Bar 2013; Schaffner, Mathieu 2020).



Figure 9 : Photographie d'un individu femelle de l'espèce *Aedes aegypti* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).



Figure 10 : Photographie d'un individu mâle de l'espèce *Aedes aegypti* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).

d. Caractéristiques spécifiques d'*Aedes albopictus*

Les individus *Ae. albopictus* ont généralement une teinte plus sombre que les individus *Ae. aegypti*.

Le clypeus des individus *Ae. albopictus* ne possède pas de soies. *Ae. albopictus* présente une ligne médiane longitudinale blanche sur la face dorsale du thorax qui ne s'étend pas à la zone préscutellaire, correspondant à la partie du scutellum la plus proche de la tête comme illustré sur la Figure 2 (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001). Les griffes des tarsi antérieurs et moyens sont simples au sein de l'espèce *Ae. albopictus* (Patsoula et al. 2006).

Les sept tergites les plus crâniens de l'abdomen possèdent une bande transversale blanche étroite qui s'élargit aux extrémités latérales. Les écailles des pleurites de l'abdomen sont noires et ne présentent pas de taches blanches argentées (Darsie, Anna 1997; Samanidou-Voyadjoglou, Harbach 2001).



Figure 11 : Photographie d'un individu femelle *Aedes albopictus* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).



Figure 12 : Photographie d'un individu mâle *Aedes albopictus* (Walter Reed Biosystematics Unit (WRBU)).

4. Cycle de vie

a. Synthèse sur le cycle de vie des moustiques du genre *Aedes*

Le cycle de développement des espèces *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* est similaire. Les individus subissent des métamorphoses complètes entre les différents stades de développement, ce qui correspond à un cycle holométabole. Les métamorphoses sont définies par des changements morphologiques et physiologiques entre les différents stades du cycle. Le cycle des *Aedes* est composé d'une phase de développement aquatique pré-imaginale et d'une phase aérienne imaginale qui est dédiée à la reproduction et à la dispersion. La phase imaginale correspond au stade adulte du développement dont les individus sont appelés imagos.

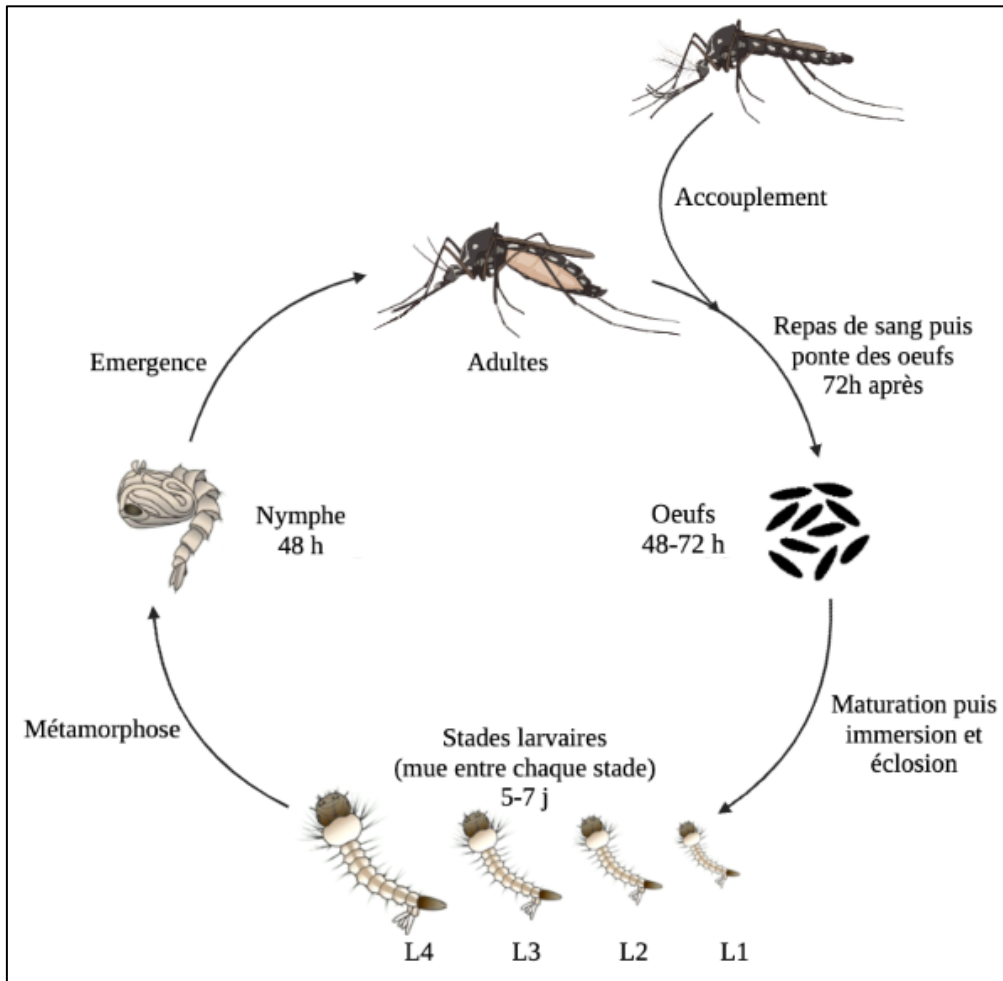


Figure 13 : Cycle biologique du genre *Aedes* (schéma original réalisé sur BioRender.com)

La phase aquatique inclut quatre stades larvaires séparés par trois mues (Figure 12). Cette phase dure entre cinq et sept jours en fonction de la température. Les larves sont munies d'un organe respiratoire spécifique, le siphon, qui leur permet de respirer sous la surface de l'eau. Elles se nourrissent de particules organiques qui se trouvent plus en profondeur. Ces larves sont très mobiles. La croissance est essentiellement réalisée au cours des stades larvaires et nymphaux, correspondant aux stades de développements précédents l'acquisition d'organes reproducteurs. La taille des imagos ne varie donc pas au cours de leur vie (Schneider et al. 2004).

Le passage du quatrième stade larvaire à la nymphe a lieu suite à une étape de métamorphose (Figure 13). Les nymphes respirent également à la surface de l'eau à l'aide d'un organe appelé trompette. Elles sont dépourvues d'orifice buccal et par conséquent ne se nourrissent pas et sont moins mobiles que les stades larvaires. Le stade nymphal dure environ deux jours.

Ensuite, lors d'une étape appelée l'émergence, la nymphe se développe jusqu'à atteindre le stade adulte (Figure 13). Cette étape marque le passage de la

phase aquatique à la phase aérienne du cycle. Dès leur émergence, les imagos butinent pour se nourrir de nectar de fleurs, ce qui procure l'énergie nécessaire à leur métabolisme.

Ils subissent ensuite une étape de maturation, qui dure 24 heures chez les mâles et 72 heures chez les femelles, à l'issue de laquelle ils chercheront rapidement à s'accoupler. Très tôt après l'émergence, les femelles sont fécondées une unique fois par un individu mâle (Helinski et al. 2012). Elles gardent ensuite la semence dans trois poches de l'appareil reproducteur destinées au stockage des spermatozoïdes, appelées spermathèques, pendant une phase de quiescence reproductive en attendant d'effectuer un repas de sang. Ce dernier permet aux femelles d'acquérir les nutriments nécessaires à la maturation des œufs.

Le troisième jour suivant le repas de sang, la ponte a lieu sur un support susceptible d'être inondé, à la surface entre une zone sèche et une zone humide (Figure 13). Les œufs sont noirs, gluants, en forme allongée et mesurent environ 0,5 millimètres (Figure 14). Les œufs des femelles *Ae. aegypti* sont en moyenne de taille plus importante que ceux des femelles *Ae. albopictus* (Suman et al. 2011). La maturation des œufs dure 48 à 72 heures. L'éclosion est déclenchée par l'immersion des œufs et a lieu quelques minutes après cette dernière (Hanson, Craig 1994; Lounibos, Escher, Lourenço-De-Oliveira 2003; Perez, Noriega 2012).

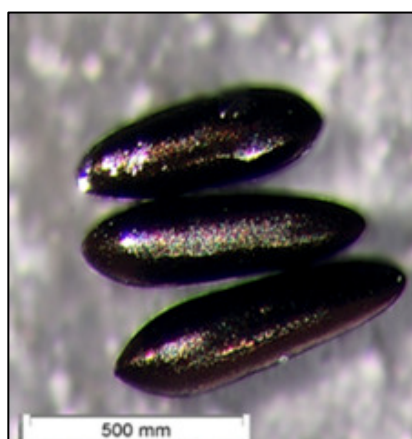


Figure 14 : Morphologie d'œufs *Aedes aegypti* (Mundim-Pombo et al. 2021)

Les œufs des deux espèces ont la capacité de rester en dormance, c'est-à-dire d'induire un retard métabolique résultant de l'impact direct de conditions environnementales défavorables. Le processus se produit lorsque l'embryon déjà formé dans l'œuf reçoit un stimulus externe qui signale des conditions défavorables

(température et humidité) dans l'environnement et empêche les larves d'éclore. Dès que les conditions environnementales sont à nouveau favorables, le développement reprend, c'est la levée de la dormance.

Les œufs *Ae. albopictus* ont, quant à eux, la capacité de rentrer en diapause, qui est la faculté génétique d'arrêter provisoirement le développement. Il s'agit d'une réponse à un changement environnemental, comme la diminution de la photopériode, qui précède l'apparition de conditions défavorables et non pas de la réponse directe à ces conditions défavorables de température et d'humidité comme c'est le cas dans le cadre de la dormance. Ce sont les femelles adultes qui sont photosensibles et qui, lorsque la durée du jour commence à diminuer en automne, vont pondre des œufs qui entreront en diapause grâce à un phénomène génétique complexe. Ainsi la diapause est plus précoce que la dormance. C'est un phénomène complexe sous contrôle hormonal et générique qui rend l'embryon à l'intérieur de l'œuf réfractaire aux stimuli extérieurs pendant un temps pré-défini (Armbruster 2016). La réalisation de la diapause est un facteur clé d'adaptation d'*Ae. albopictus*. Elle permet à l'espèce de subsister à des conditions défavorables et favorise la dissémination d'*Ae. albopictus* dans les zones avec un climat plus tempéré où les hivers sont froids. Les populations qui vivent dans des zones tropicales ou sub-tropicales ne réalisent pas de diapause (Diniz et al. 2022).

b. Influence de la température sur le cycle de développement

La durée des étapes du cycle de vie d'*Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* est influencée par un ensemble de paramètres environnementaux qui peuvent être étudiés pour prédire le développement de ces moustiques. La température ainsi que ses variations influencent grandement le cycle de développement de ces moustiques. D'autres facteurs comme le nombre de larve par m³ d'eau, la nourriture disponible et la durée de la photopériode ont également été répertoriés comme influençant le cycle de vie des moustiques du genre *Aedes* (Couret, Benedict 2014).

La température du milieu influence également le taux de mortalité. Ainsi, le taux de mortalité des individus *Ae. aegypti* est le plus bas pour des températures entre 20 et 30°C (Couret, Dotson, Benedict 2014).

La température optimale de développement d'*Ae. albopictus* est de 26°C, alors qu'elle est légèrement plus élevée autour de 27,5°C pour *Ae. aegypti*. Des individus

adultes *Ae. aegypti* ont été retrouvés pour des températures entre 15 et 30°C. Pour ce qui est d'*Ae. albopictus*, des individus adultes ont été retrouvés à des températures de 10°C voir négatives selon les souches. Ainsi, *Ae. albopictus* est plus adapté à des zones géographiques présentant un climat plus tempéré qu'*Ae. aegypti* qui se développera préférentiellement à des températures plus élevées (Alto, Juliano 2001; Paupy et al. 2009; Yang et al. 2009).

c. Préférence trophique

Les individus *Ae. aegypti* sont anthropophiles alors qu'*Ae. albopictus* est plus opportuniste. L'humain reste l'hôte de choix pour ce moustique capable de se nourrir aussi bien sur des mammifères que des oiseaux ou des reptiles. *Aedes albopictus* a un comportement plus agressif et opportuniste. Les moustiques du genre *Aedes* piquent plutôt durant la journée et à l'extérieur (Richards et al. 2006; Valerio et al. 2009; Delatte et al. 2010; Kamgang et al. 2012; Egid et al. 2022).

5. Distribution géographique d'*Aedes aegypti* et d'*Aedes albopictus*

Ces deux espèces présentent une évolution similaire de leurs aires de répartition géographiques respectives. En effet, leur plasticité phénotypique a permis une adaptation à des environnements moins favorables à leur développement, aboutissant à une extension de leur distribution géographique (Kraemer et al. 2019).

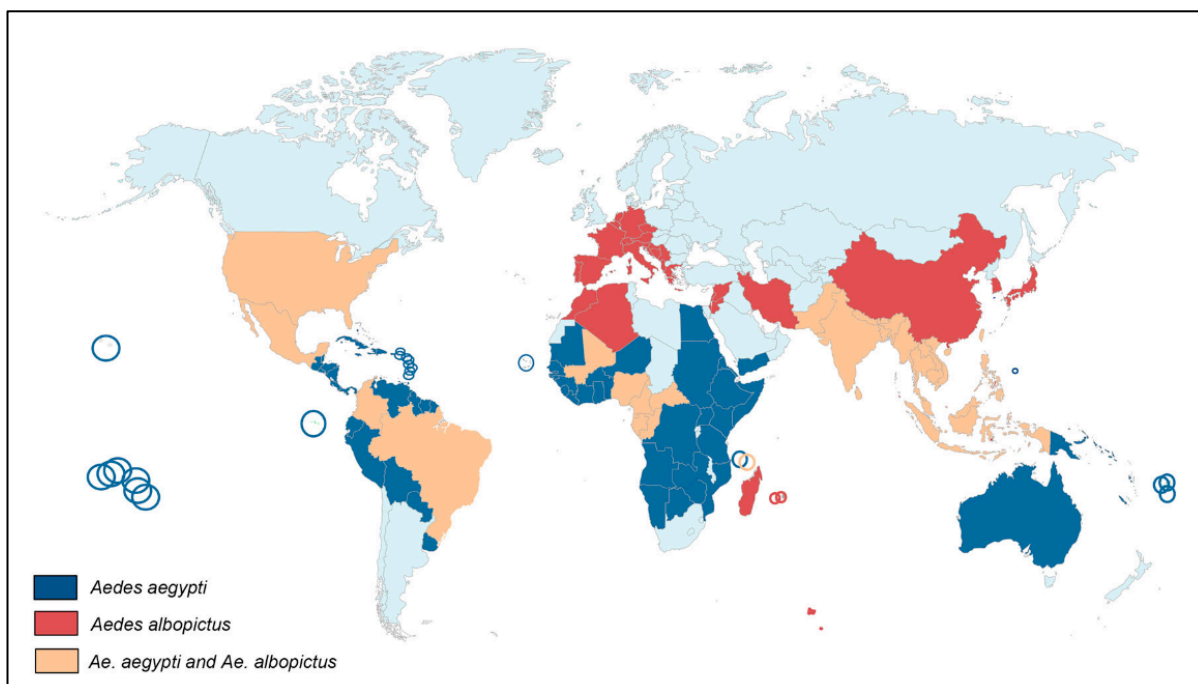


Figure 15 : Répartition mondiale des espèces *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* (Houé, Bonizzoni, Failloux 2019)

a. Extension géographique d'*Aedes aegypti*

Ae. aegypti est une espèce originaire d'Afrique. Elle descend d'une forme ancestrale sauvage de moustique, nommée *Ae. aegypti formosus*, qui aurait persisté dans les forêts d'Afrique subsaharienne (Brown et al. 2014). L'espèce *Ae. aegypti* telle qu'elle est connue aujourd'hui a développé une capacité à vivre à proximité des humains dans une relation commensale où le moustique est préférentiellement anthropophile, vit et se reproduit dans des installations humaines et réalise la ponte de ses œufs ou oviposition dans des récipients artificiels. Cette adaptation qui s'apparente à une domestication a probablement eu lieu en Afrique (Foote 1961) et a permis une persistance de l'espèce au contact des hommes, favorisant sa propagation. Une étude menée sur la comparaison du polymorphisme actuel au sein de l'espèce *Ae. aegypti* montre que cette espèce aurait été introduite en Amérique au XVI ou XVII^{ème} siècle à partir de l'Afrique de l'Ouest via des bateaux utilisés pour le commerce d'esclaves (Bryant, Holmes, Barrett 2007). La répartition géographique de cette espèce s'est ensuite étendue à l'Océanie puis à l'Asie suite à l'importation d'individus par les transports maritimes. La croissance des populations et l'urbanisation massive qui ont eu lieu dans les années 1950 ont par la suite favorisé la prolifération des individus *Ae. aegypti* dans les zones urbaines et péri-urbaines

notamment en Afrique centrale, en Asie du Sud et en Amérique du Sud (Powell, Tabachnick 2013).

Aujourd'hui, *Ae. aegypti* est présent dans la majorité des zones tropicales et subtropicales du monde (Figure 15) : en Afrique Subsaharienne, en Amérique centrale du sud des États-Unis à l'Argentine, en Océanie, en Asie du Sud-Est et en Inde (Kraemer et al. 2015). Sa répartition géographique en constante extension est mise à jour par des systèmes de surveillance et d'identification des individus trouvés aux points clés des échanges internationaux. En juillet 2018, un individu de l'espèce *Ae. aegypti* a été mis en évidence au port de Marseille suite à l'amarrage d'un navire en provenance du Cameroun. Cette espèce n'avait jusqu'alors jamais été recensée en Europe (Jeannin et al. 2022). Comme le montre la Figure 16, cette espèce est présente actuellement sur la côte est de la mer Noire ainsi que sur l'île de Madère.

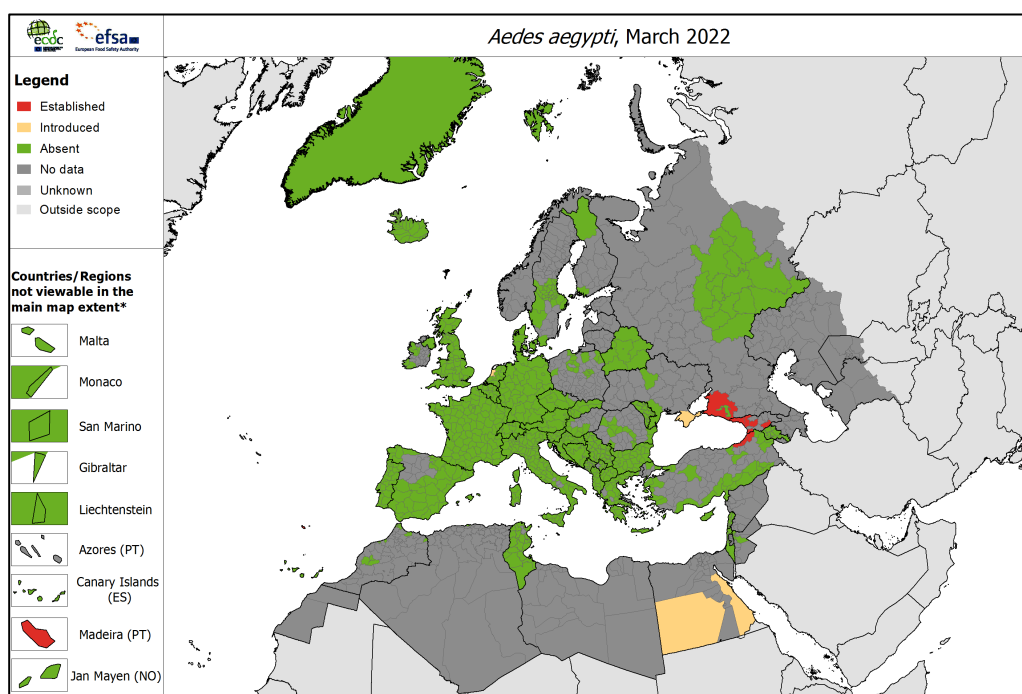


Figure 16 : Répartition d'*Aedes aegypti* en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control)

b. Extension géographique d'*Aedes albopictus*

Ae. albopictus est une espèce originaire d'Asie, et plus précisément des forêts tropicales d'Asie du sud-est. L'extension de la répartition de cette espèce au sud-ouest de l'océan Indien a ensuite été corrélée avec la colonisation de cette région par les peuples indonésiens par voie maritime. En effet, la présence d'eau potable dans les cales des navires ainsi que la proximité des humains a permis la réalisation du cycle biologique d'*Ae. albopictus* et son transport sur de longues distances. Elle a

ensuite été introduite dans le monde entier à partir des années 1970 avec la multiplication des échanges commerciaux et notamment le commerce de pneus usagés entre l'Asie, l'Europe et les États-Unis (Reiter 1998).

Ae. albopictus a été introduit en Europe pour la première fois en l'Albanie en 1979. Puis, suite à la chute du régime communiste, la reprise du commerce entre l'Albanie et le reste de l'Europe a donné lieu à la colonisation de l'Italie en 1990 puis de la France en 1999 par l'espèce *Ae. albopictus*. L'extension de la répartition géographique d'*Ae. albopictus* au reste de l'Europe s'est ensuite réalisée par les échanges commerciaux via les transports routiers (Swan et al. 2022). En quelques dizaines d'années, *Ae. albopictus* est devenue une espèce prédominante dans plusieurs régions du monde comme l'Afrique australe et centrale, le continent Américain, l'Asie du Sud-Est, l'Océanie et l'Europe méditerranéenne (Kraemer et al. 2015). La figure suivante expose la répartition actuelle de l'espèce *Ae. albopictus* en Europe. Cette répartition est concentrée autour du bassin Méditerranéen.

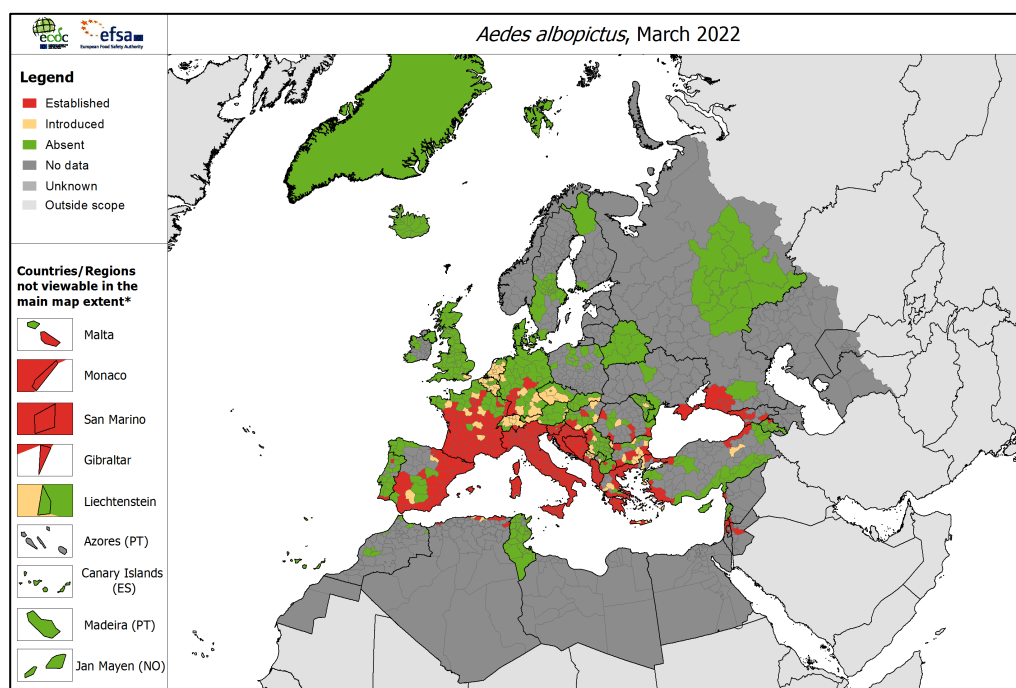


Figure 17 : Répartition d'*Aedes albopictus* en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control)

En France, la première identification de population d'*Ae. albopictus* a eu lieu en 1999 dans deux zones de stockage de pneus usagés importés des États-Unis ou du Japon, situées dans le département de l'Orne, en Normandie, et dans la Vienne, en Poitou-Charentes. Un système de surveillance des zones de commerces avec des pays à risque pour l'introduction d'*Ae. albopictus* a par la suite été mis en place par

le Ministère de la Santé. D'autres populations *Ae. albopictus* ont ainsi été mise en évidence dans la moitié Nord de la France. Des mesures de contrôle ont ensuite permis d'éradiquer ces populations et aucun autre cas d'introduction n'a été reporté jusqu'en 2006. Cependant, en parallèle, le trafic routier s'est révélé être un moyen de colonisation géographique pour l'espèce. *Aedes albopictus* a ainsi été introduit en Corse en 2002. La propagation de cette espèce à partir de l'Italie s'est donc réalisée en suivant les axes routiers (Takken, Knols 2007). Aujourd'hui, *Ae. albopictus* est installé de façon pérenne dans 67 départements de la France métropolitaine (Figure 18).

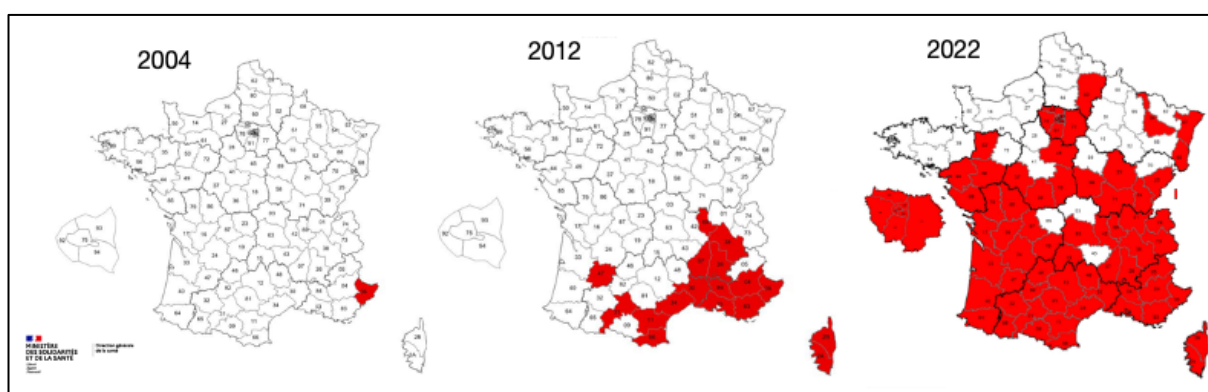


Figure 18 : Répartition géographique d'*Aedes albopictus* en 2004, 2012 et 2021. Les départements où *Aedes albopictus* est présent sont en rouge. (Ministère de la Santé et de la prévention)

Aedes albopictus était à l'origine un insecte « rural » car il se reproduisait préférentiellement dans un habitat naturel et vivait à l'orée des forêts (Higa 2011). Ce moustique s'est ensuite adapté au milieu urbain et péri-urbain jusqu'à pondre dans des récipients artificiels (Caputo et al. 2012; Wu et al. 2010). Il n'est cependant pas devenu dépendant du milieu urbain comme *Ae. aegypti*.

c. Capacité d'adaptation d'*Aedes albopictus*

Le caractère invasif d'*Ae. albopictus* provient de sa capacité à s'adapter à différents environnements et à différents climats. En effet, *Ae. albopictus* présente une résistance accrue aux basses températures : ainsi, des individus adultes ont été observés à une température pouvant atteindre les -5°C aux États-Unis (Paupy et al. 2009). Lorsque la durée de la période diurne diminue et à des températures inférieures, les œufs ont la capacité d'entrer en diapause qui est une forme de vie ralentie (Hanson, Craig 1994; Lounibos, Escher, Lourenço-De-Oliveira 2003). Cette

diapause est induite selon des conditions variables en fonction de la zone géographique. Dans des conditions de laboratoire et à une température de 21°C, la diapause est induite par une période diurne inférieure à 13 heures. Cependant, des études se déroulant en Amérique du Nord ont montré une influence de la latitude dans l'induction de la diapause. En effet, les populations situées plus au Nord ont une diapause induite par une photopériode plus longue, pouvant aller jusqu'à 14 heures, car les hivers sont plus rudes (Armbruster 2016). *Ae. albopictus* peut pondre dans des gîtes larvaires de différentes natures : aussi bien en milieu urbain, fortement anthropisé, qu'en milieu rural. *Ae. albopictus* se reproduit à l'origine dans un environnement naturel comme des creux d'arbres ou des souches de bambous. Une adaptation aux milieux urbains permet désormais le développement des larves dans des conteneurs artificiels comme des pneus ou des zones de stockage d'eau (Bonizzoni et al. 2013). Cette forte adaptabilité est due à une plasticité génotypique de l'espèce ou bien à une adaptation locale de différents génotypes.

Son comportement opportuniste, expliquant la diversité des hôtes sur lesquels *Ae. albopictus* peut effectuer son repas de sang, est à l'origine du nombre important de pathogènes potentiellement vectorisés et de son adaptation à de nombreux environnements (Paupy et al. 2009). En effet, bien qu'*Ae. albopictus* soit préférentiellement anthropophile, il est opportuniste et, lorsque son environnement est propice, il présente un caractère zoophile et peut effectuer son repas de sang sur divers animaux comme des mammifères, des oiseaux, des amphibiens ou des reptiles (Bonizzoni et al. 2013).

Par ailleurs, *Ae. albopictus* est une espèce compétitrice. Cette espèce est capable de freiner le développement larvaire d'une autre espèce en créant des interférences chimiques ou en introduisant des parasites dans l'environnement (Juliano 2009; Reiskind, Lounibos 2009; Brown et al. 2011; Bargielowski, Lounibos, Carrasquilla 2013). Les individus mâles *Ae. albopictus* interfèrent dans la reproduction d'autres espèces de moustiques, comme *Ae. aegypti*, en recherchant l'accouplement avec les femelles, ce qui provoque une baisse de la fécondité au sein des autres espèces (Juliano, Philip Lounibos 2005).

6. Compétences vectorielles de ces deux espèces

La compétence vectorielle désigne l'aptitude intrinsèque d'un arthropode à transmettre un agent pathogène. Elle résulte des facteurs permettant la multiplication de ce pathogène dans l'organisme du vecteur puis de sa transmission à un hôte lors du repas sanguin. La notion de compétence vectorielle inclut celle de capacité vectorielle qui regroupe les conditions extrinsèques au vecteur permettant la transmission d'un agent pathogène, comme l'humidité et la température notamment (Souza-Neto, Powell, Bonizzoni 2019).

Les moustiques du genre *Aedes* sont des vecteurs de nombreux agents pathogènes responsables de graves maladies chez l'Homme comme : la fièvre jaune, la dengue, le Chikungunya et le Zika ou encore la fièvre du Nil occidentale, la fièvre de la vallée du Rift, l'encéphalite équine de l'Est, les dirofilarioses, ainsi que les fièvres de Marayo, Usutu et Ross river (Medlock et al. 2012).

Le principal vecteur de ces maladies, en Afrique sub-saharienne, en Amérique centrale et en Asie du sud-est, est *Ae. aegypti*. En effet, les virus de la fièvre jaune, de la dengue, du Chikungunya et Zika sont originaires d'Afrique sub-saharienne comme l'espèce *Ae. aegypti*. L'hypothèse d'une coévolution entre le vecteur et ces agents pathogènes afin d'expliquer les capacités vectorielles d'*Ae. aegypti* a été émise (Powell 2018). *Aedes albopictus*, seul ou en complément d'*Ae. aegypti* joue également un rôle de vecteur de ces maladies dans des zones plus tempérées auxquelles il est adapté comme l'Europe (Lambrechts, Scott, Gubler 2010).

La compétence vectorielle d'un individu d'une espèce dépend de la population dont il est originaire. En effet, l'adaptation des agents pathogènes à une population donnée de vecteur permet une meilleure compétence vectorielle de cette dernière (Souza-Neto, Powell, Bonizzoni 2019).

B. *Phlebotomus perniciosus*

Les phlébotomes sont des insectes diptères nématocères. On distingue plus de 900 espèces de phlébotomes, qui sont des insectes diptères nématocères, réparties en cinq genres (*Phlebotomus*, *Sergentomyia*, *Lutzomyia*, *Brumptomyia* et *Warileyia*) ont été identifiées dans le monde. Parmi ces espèces, *Phlebotomus*

perniciosus est la principale espèce vectrice de protozoaires du genre *Leishmania* et d'arbovirus en France et en Europe (Alemayehu, Alemayehu 2017).

1. Taxonomie

Les phlébotomes sont des arthropodes, insectes de l'ordre des Diptères et du sous-ordre des Nématocères. Ils sont inclus dans la famille des *Psychodidae* et plus précisément la sous-famille des *Phlebotominae* (Lewis et al. 1977), caractérisée notamment par la présence de nombreuses soies réparties sur la tête, le thorax, les pattes et les ailes (Benallal et al. 2022). Cette sous-famille regroupe environ 900 espèces. Elles sont réparties en trois genres que sont *Phlebotomus*, *Lutzomyia* et *Sergentomyia* (Lewis et al. 1977; Berdjane-Brouk et al. 2012; Senghor et al. 2016).

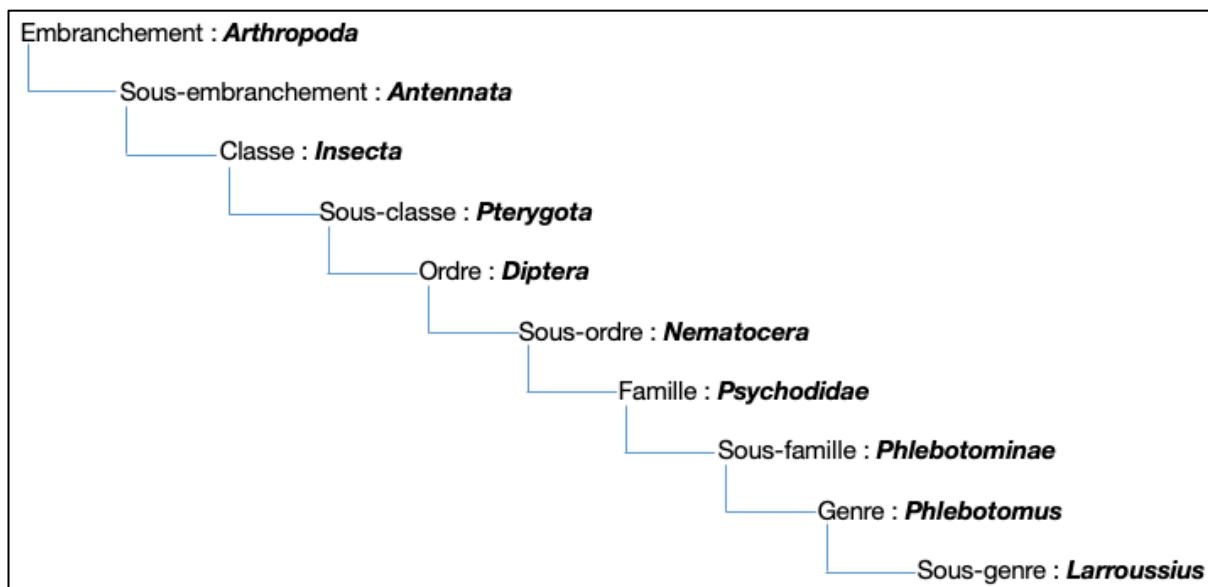


Figure 19 : Taxonomie du sous-genre *Larroussius* (schéma original)

L'espèce *Phlebotomus perniciosus*, appartient au genre *Phlebotomus* et au sous genre *Larroussius* (Lewis et al. 1977; Senghor et al. 2016). Les individus femelles du sous genre *Larroussius* sont caractérisées par des spermathèques annelées pourvues d'un col plus ou moins long (Figure 20) ainsi que par un pharynx présentant des petites pointes comme illustré sur la figure 21 (Léger et al. 1983; Benallal et al. 2022).

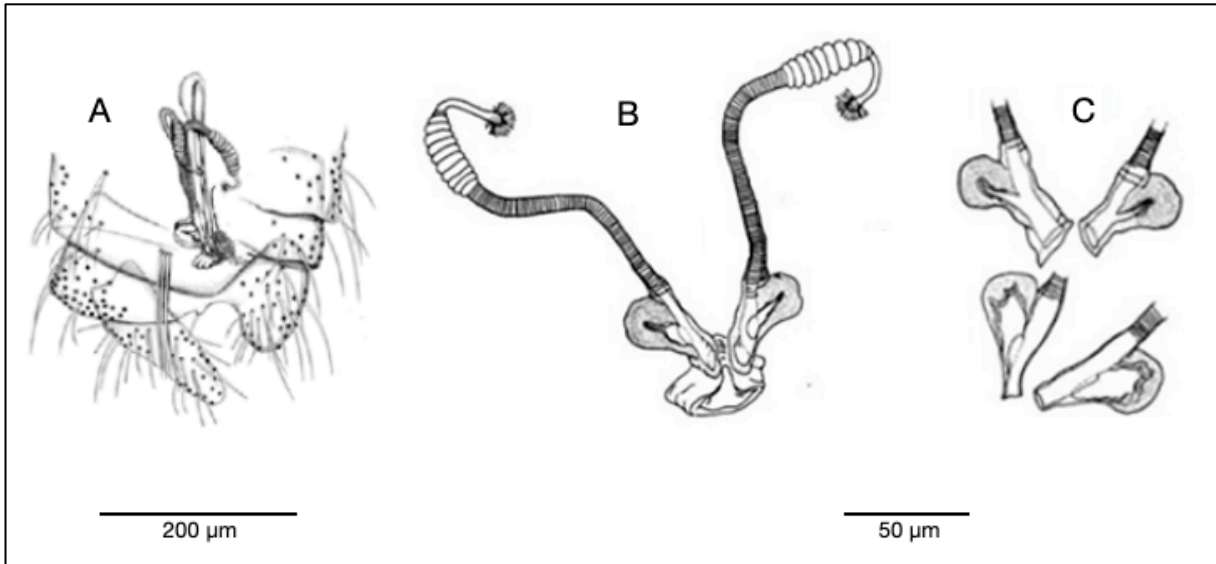


Figure 20 : Schéma de l'appareil génital des femelles *Phlebotomus perniciosus* (A), de leur spermathèques (B) et de l'aspect des réservoirs situés en partie sub-terminale de l'appareil génital (C). (Benallal et al. 2022; Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014)

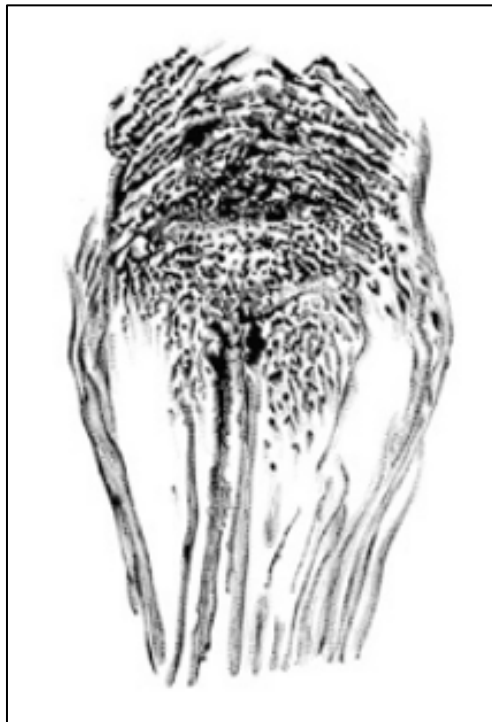


Figure 21 : Aspect du pharynx des femelles de l'espèce *Phlebotomus perniciosus* (Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014).

Une particularité des individus mâles du sous-genre *Larrousius* est la présence de cinq épines sur les orifices génitaux, appelés styles, et d'un édéage, correspondant au pénis, long et de forme différente selon les espèces comme illustré sur la Figure 22 (Lane 1993; Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014).

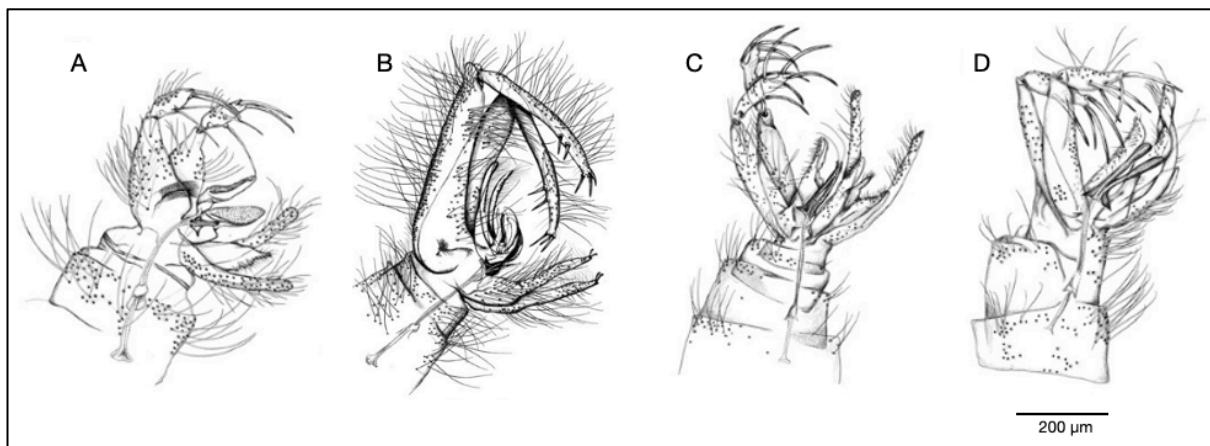


Figure 22 : Schéma de l'appareil génital mâle chez les espèces *Phlebotomus sergenti* (A), *papatasi* (B), *perniciosus* (C) et *ariasi* (D) appartenant au sous-genre *Larroussius* (Dantas-Torres, Tarallo, Otranto 2014).

2. Historique

Les études s'intéressant à la taxonomie des phlébotomes ont commencé au XVIII^{ème} siècle. En 1786, la première espèce à avoir été décrite est *Phlebotomus papatasi*. L'entomologiste britannique E. Newman crée la famille des *Psychodidae* en 1834 qui regroupe plus de 3000 espèces réparties en 144 genres (Newman 1834; Pape, Blagoderov, Mostovski 2011). En 1840, Rondani et Berté établissent une liste groupant des espèces au sein de la sous-famille des *Phlebotominae* (Rispaïl, Léger 1998). Différents genres ont par la suite été créés puis remis en cause au cours du XX^{ème} siècle. Des études phylogénétiques et des analyses de matériels génétiques sont toujours en cours pour essayer de définir ces genres et les espèces regroupées au sein des *Phlebotominae*.

L'espèce *Ph. perniciosus* a été identifiée pour la première fois à Malte par l'entomologiste britannique R. Newstead en 1911. Elle a ensuite été classée dans le sous-genre *Larroussius* créé en 1931 par Nitzulescu (Di Muccio et al. 2000).

3. Morphologie des adultes

L'identification des phlébotomes est généralement basée sur la reconnaissance de critères morphologiques. Depuis plusieurs années, l'identification d'espèces utilisant la biologie moléculaire s'est développée, et plus récemment

l'identification basée sur l'utilisation de MALDI-TOF, ou Matrix Assisted Laser Desorption Ionization - Time of Flight en anglais. Il s'agit d'un spectromètre de masse à temps de vol de désorption-ionisation laser assisté par matrice permettant de différencier des protéines de façon précise et répétable. Il est utilisé couramment dans la reconnaissance des bactéries et champignons et plus récemment l'identification d'espèces d'arthropodes vectrices (Mathis et al. 2015).

Les individus de l'espèce *Ph. perniciosus* sont des insectes de petite taille : ils mesurent entre deux et trois millimètres de long. Ils sont de couleur beige à brune et d'apparence filiforme (Figure 23).



Figure 23 : Phlébotome femelle de l'espèce *Phlebotomus perniciosus* (Prudhomme 2015)

La tête est formée d'une capsule chitineuse nommée épicroâne. Les antennes, qui s'insèrent sur la région frontale, sont identiques chez les deux sexes. Elles sont composées de 16 segments, deux basaux et 14 segments plus minces constituant le flagellum. L'ensemble des pièces buccales forment une courte trompe et seuls les femelles présentent des mandibules dentelées (Killick-Kendrick 1990).

Le thorax convexe est constitué de trois segments fusionnés que sont le prothorax, le mésothorax et le métathorax (Figure 24). Ces trois segments portent respectivement une paire de patte. Ces dernières sont longues, fines, articulées et recouvertes de soies. Les ailes lancéolées sont dressées au-dessus du corps au repos en formant un angle de 45° (Dedet, Addadi, Bellazoug 1984).

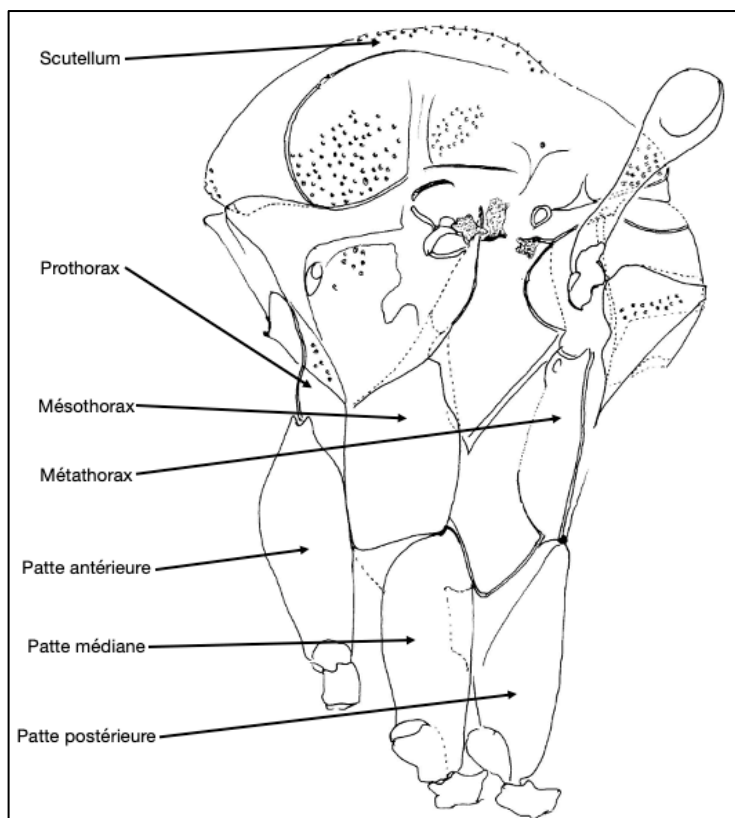


Figure 24 : Schéma du thorax d'un phlébotome adulte (Galati et al. 2017)

L'abdomen cylindrique est composé de 10 segments dont les trois derniers sont modifiés pour constituer l'appareil génital externe (Figure 25). A l'œil nu, la distinction entre les adultes mâle et femelle est possible avec l'observation de la forme de l'abdomen. Chez les mâles, l'abdomen est étroit et son extrémité est recourbée dorsalement. L'appareil génital développé des mâles (Figure 22) possède trois paires de prolongements : les coxites sur lesquels s'articulent les styles, les paramères et les lobes latéraux qui sont plus ventraux. L'édéage a une forme généralement bifurque à son extrémité mais qui peut parfois être seulement incurvée (Dedet, Addadi, Bellazoug 1984; Boussaa et al. 2008). Alors que l'abdomen des femelles est de forme allongée plus ellipsoïde.

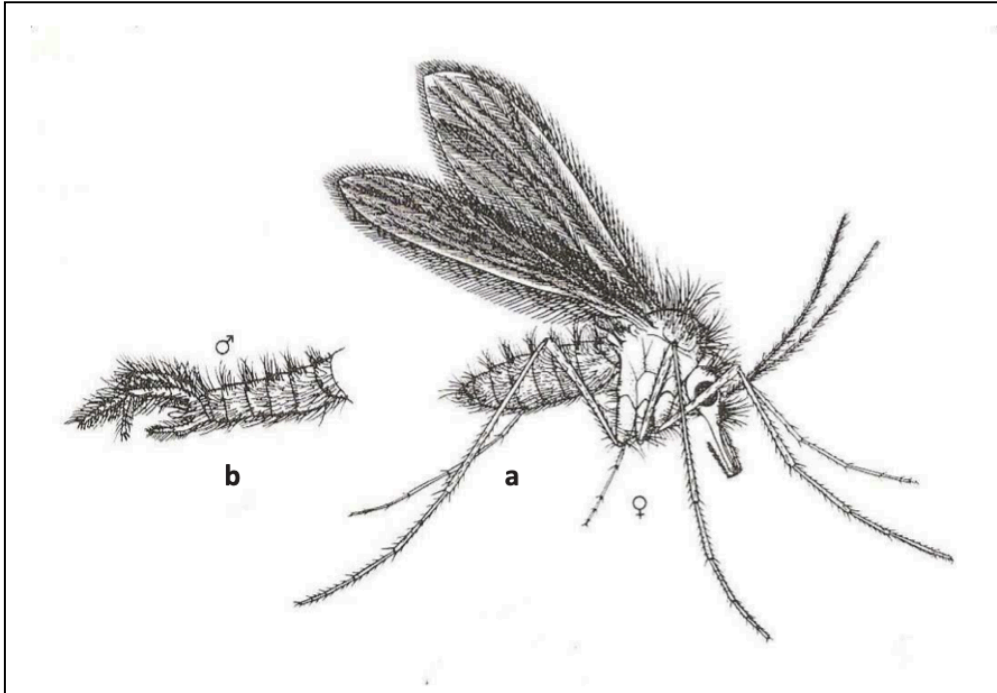


Figure 25 : Morphologie d'un phlébotome adulte (a) Imago femelle ; (b) Derniers segments abdominaux d'un imago mâle (Lane 1993).

4. Bio-écologie de *Phlebotomus perniciosus*

a. Habitat

Les phlébotomes ont une durée de vie moyenne comprise entre deux semaines et deux mois. Des facteurs comme l'humidité et la température du milieu sont susceptibles d'influencer cette durée. Ainsi la longévité des phlébotomes est favorisée par un environnement peu venté, humide et avec de faibles variations de températures (Dolmatova et al. 1971; Depaquit, Léger 2017).

Phlebotomus perniciosus est adapté à la vie rurale, péri-urbaine ou urbaine (Bongiorno et al. 2003). La densité des individus dépend de facteurs climatiques, environnementaux et de la disponibilité d'hôtes pour leur repas sanguin qui est réalisé préférentiellement sur des mammifères présents dans leur environnement proche. Ainsi, on retrouve préférentiellement des phlébotomes à proximité de terriers de rongeurs, d'exploitations d'animaux de production ou d'écurie (Tarallo et al. 2010). La présence de fumier ou d'humus est un facteur favorisant à la présence des phlébotomes car les stades immatures se nourrissent de débris organiques (Sharma, Singh 2008).

Les phlébotomes sont des insectes crépusculaires ou nocturnes actifs d'avril à novembre dans les zones tempérées. Ainsi, les lieux de repos des phlébotomes pendant la journée se trouvent en dehors des habitations dans des lieux humides, tempérés et peu ventés comme dans des creux d'arbres, des crevasses, des aspérités de vieux murs ou bien des granges (Figure 26). Ce comportement est dit exophile. D'autre part, le repas sanguin a majoritairement lieu à l'intérieur, ce qui s'apparente à un comportement endophage (Bongiorno et al. 2003). En effet, *Ph. Perniciosus* est une espèce attirée par la lumière artificielle et est donc potentiellement visibles au sein des foyers (Dolmatova et al. 1971).



Figure 26 : Exemple d'habitat de *Phlebotomus perniciosus* à Ticino en Suisse (Prudhomme 2015)

b. Cycle de vie

Le cycle des phlébotomes (Figure 27) est holométabole et comprend une métamorphose complète. Le développement de l'œuf à l'adulte chez les phlébotomes prend en moyenne entre 20 et 60 jours dans des conditions optimales de températures et d'humidité.

Les individus des deux sexes se nourrissent de sucres floraux et fruitiers ainsi que de miellats de pucerons (Killick-Kendrick 1999), cependant seulement les femelles prennent un repas sanguin, qui est nécessaire pour la maturation des œufs. L'accouplement, de durée variable entre deux et 25 minutes, peut avoir lieu avant, pendant ou après le repas sanguin, à proximité des zones de repos. Il peut se dérouler en vol ou au sol et est précédé d'une parade nuptiale de la part du phlébotome mâle (Killick-Kendrick 1999). L'oviposition a lieu six à huit jours après le repas sanguin et est stimulée par un contact avec une surface humide. Les femelles phlébotomes

succombent souvent lors de la ponte. Cent à cent-dix œufs sont pondus un à un de façon non agglomérée à proximité des lieux de repos dans des futurs gîtes larvaires (Müller, Kravchenko, Schlein 2011). Il s'agit de zones avec une température relativement constante entre 26 et 30°C, une protection contre la dessiccation et à proximité de la matière organique en décomposition (Killick-Kendrick 1999; Alexander 2000). La durée de l'embryogenèse dépend de la température ambiante, il peut donc y avoir près de 30 jours de différences entre la date d'éclosion d'œufs d'un même lot. En moyenne, les œufs éclosent dix jours après la ponte. Ceux contenant des individus mâles éclosent 24 à 48 heures avant ceux contenant des femelles (Dolmatova et al. 1971; Killick-Kendrick 1999).

Après l'éclosion, quatre stades larvaires se succèdent et une mue a lieu entre chacun de ces stades. Les larves vivent dans le substrat du lieu de ponte, soit dans la terre ou la vase. Elles se nourrissent de matières organiques d'origine végétale ou animale en décomposition ainsi que de plantes et sont donc qualifiées de saprophages et phytophages. La durée du développement de ces stades larvaires varie de deux semaines à deux mois en fonction de la température. Ce sont les larves de stade quatre qui entrent le plus souvent en diapause pendant les périodes hivernales où les conditions ne sont pas favorables au développement de l'espèce. Les œufs sont également capables de réaliser ce processus (Dolmatova et al. 1971; Killick-Kendrick 1999; Ready 2013).

Suite à une métamorphose, l'individu au stade larvaire quatre qui est au préalable remonté à la surface dans une zone moins humide, devient une nymphe. Le stade nymphal dure environ sept jours pendant lesquels l'individu ne se nourrit pas et est sédentaire. La nymphe reste accrochée au substrat par un reste de cuticule d'origine larvaire resté accroché à son abdomen, appelé exuvie (Killick-Kendrick 1999).

La mue imaginale a ensuite lieu, donnant naissance à l'individu adulte. Les femelles adultes vivent en moyenne entre 15 jours et deux mois alors que la durée de vie des mâles est plus restreinte.

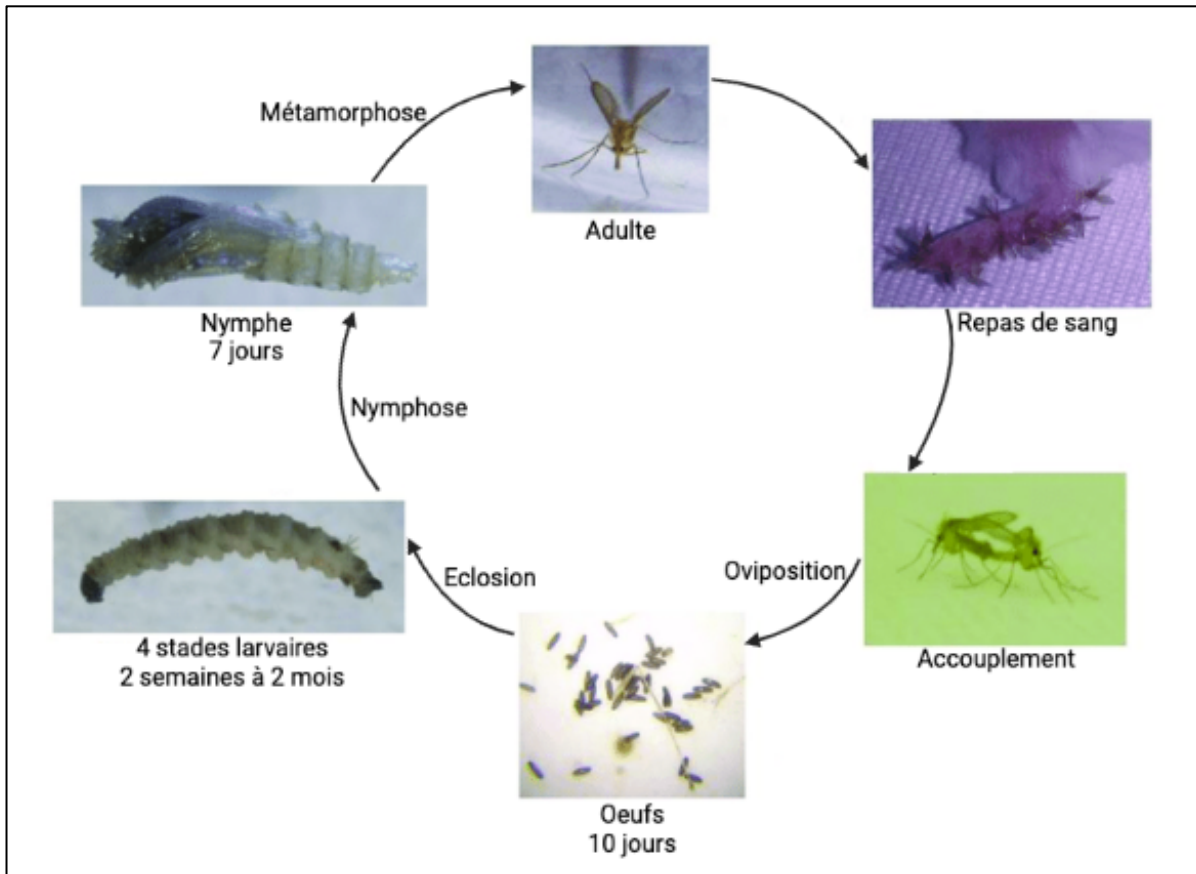


Figure 27 : Cycle de vie du phlébotome (schéma original réalisé sur Biorender.com)

c. Comportement hématoophage

Les phlébotomes sont présents d'avril à octobre sur le pourtour Méditerranéen (Alten et al. 2016). Ils sont plus actifs au crépuscule et la nuit à condition que la température ambiante ne soit pas trop basse et qu'il y ait moins de 1-1,5 m/s de vent (Lane 1993; Sharma, Singh 2008). Par un temps orageux, il est possible d'observer des phlébotomes en pleine journée.

Seulement les femelles prennent un à plusieurs repas sanguins par cycle gonotrophique. Les femelles du genre *Phlebotomus* prennent leur repas de sang majoritairement sur des mammifères tels que les humains, chevaux, chiens, bovins, ovins, porcs et rongeurs, cependant elles peuvent également se nourrir sur des oiseaux ou des batraciens (Sharma, Singh 2008; Bongiorno et al. 2003; Rossi et al. 2008). *Phlebotomus perniciosus* est une espèce opportuniste, la disponibilité de l'hôte influence plus le choix de la femelle qu'une réelle préférence trophique pour une espèce (Bongiorno et al. 2003; Rossi et al. 2008). Les zones de piqûre préférentielles sont les zones glabres chez les animaux et les parties du corps découvertes chez l'Homme (Dolmatova et al. 1971).

La durée du repas sanguin varie entre quelques secondes et 15 minutes mais est généralement inférieure à cinq minutes. Le repas de sang est facilement interrompu et les femelles ont la possibilité de compléter ce dernier en repiquant le même hôte ou un hôte différent (Dolmatova et al. 1971; Rossi et al. 2008).

Les phlébotomes, sont des insectes telmophages. Ils créent une collection sanguine par lacération du derme dont ils aspirent le contenu. La salive du phlébotome possède des propriétés anticoagulantes, vasodilatatrices et immunogènes. C'est par l'injection de salive au moment de la piqûre que le phlébotome peut transmettre des pathogènes à l'hôte (Kamhawi 2000).

5. Distribution géographique

Les phlébotomes occupent une aire de répartition géographique très étendue (Figure 28). Ils sont présents en majorité dans les régions tempérées à chaudes tels que le Bassin Méditerranéen, le Moyen Orient, l'Amérique du Sud, l'Asie et l'Afrique (Killick-Kendrick 1999; Alten et al. 2015; Depaquit, Léger 2017). A la faveur du réchauffement climatique, des transports et de l'urbanisation, leur distribution s'étend vers le Nord de l'Europe (Desjeux 2001).

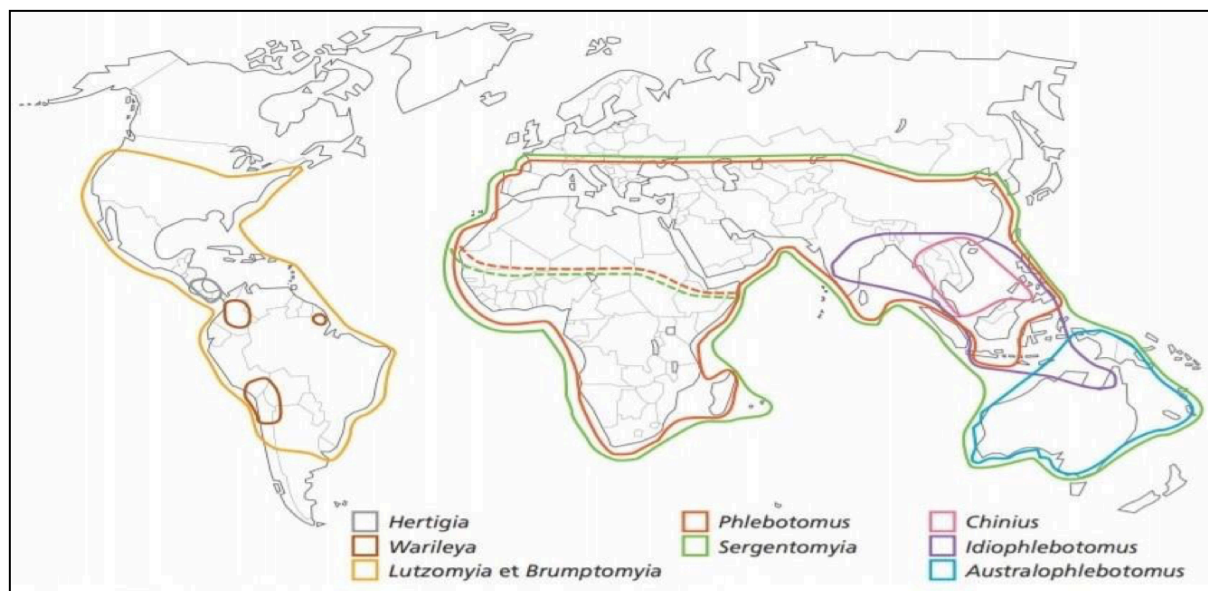


Figure 28 : Distribution mondiale des principaux genres de phlébotomes (Depaquit, Léger 2017)

Les phlébotomes possèdent des compétences de vol réduites ; ils se déplacent par une alternance de vols courts et de périodes de repos. En effet, ils

peuvent se déplacer passivement avec les courants d'air sur des distances allant jusqu'à 2,5 km mais leur distance de vol actif dépasse rarement le kilomètre. Ils sont incapables de se déplacer activement en présence de vent et par conséquent ne sortent que par un temps sec et calme. Ils ont donc du mal à coloniser des zones isolées telles que les îles. Ils sont cependant parfois transportés passivement par le vent, ce qui permet la colonisation de nouveaux territoires. Ces insectes peuvent être retrouvées à une altitude allant jusqu'à 3500 mètres (Sharma, Singh 2008; Maroli et al. 2010).

Concernant l'espèce *Ph. perniciosus*, elle a été répertoriée en majorité dans l'ensemble du pourtour Méditerranéen à des altitudes inférieures à 1000 mètres mais elle peut se trouver dans des régions bien plus au nord, comme le sud de l'Allemagne (Naucke et al. 2008), ainsi que dans le sud-ouest de la France depuis quelques années (Figure 29). Cette espèce est également présente en Asie de l'Ouest (Sharma, Singh 2008). *Phlebotomus perniciosus* semble être une espèce adaptée pour occuper des niches écologiques plus au nord de l'Europe. En effet, les changements climatiques en cours tendent à favoriser une hausse des températures qui serait favorable au développement de cette espèce de phlébotomes (Medlock et al. 2014). D'après les modélisations de Fisher et al. (2011) et plus récemment de Koch et al. (2017), les changements environnementaux et climatiques qui se profilent actuellement en Europe sont en faveur de l'extension de l'aire de répartition des phlébotomes vers le nord pour les 30 prochaines années (Fischer et al. 2011; Koch et al. 2017).

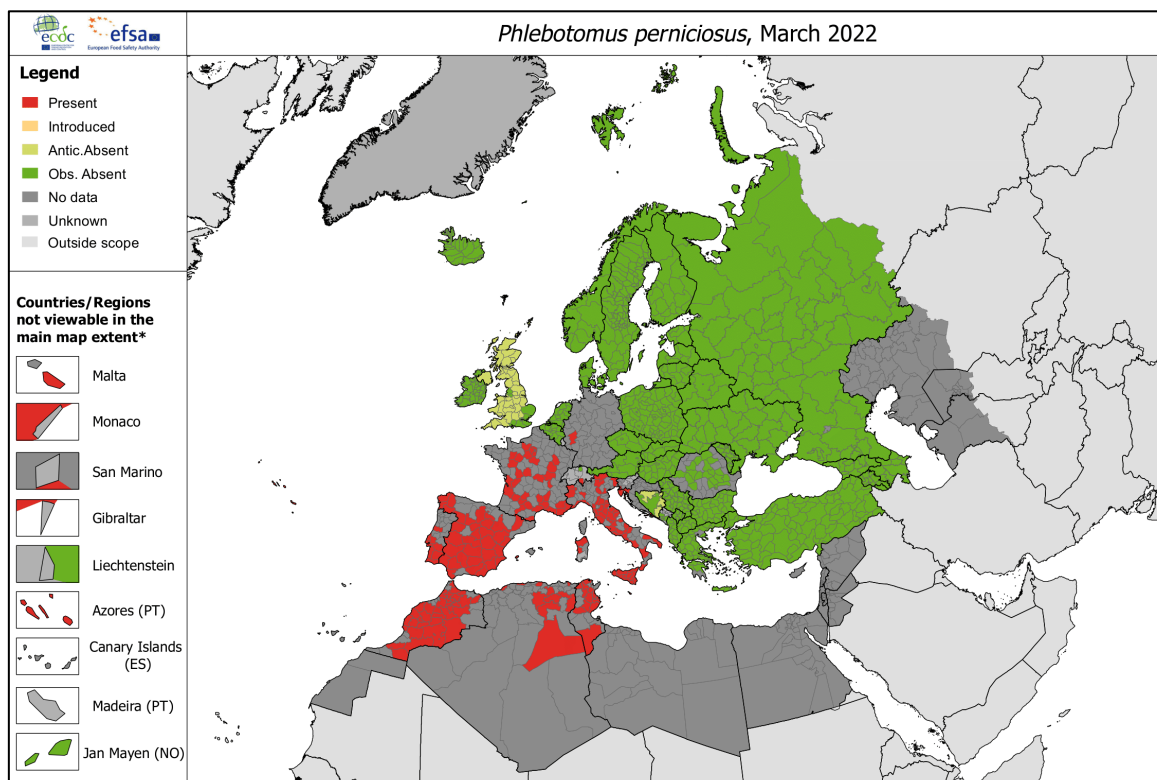


Figure 29 : Répartition de *Phlebotomus perniciosus* en Europe en mars 2022 (European Centre for Disease Prevention and Control)

6. Compétences vectorielles

a. Vecteur de leishmanies

i. Étiologie

La leishmaniose est une maladie zoonotique parasitaire causée par des protozoaires appartenant au genre *Leishmania*. Le cycle de ces parasites intracellulaires des macrophages et des monocytes est diphasique. Cette espèce nécessite deux hôtes pour réaliser son cycle évolutif : le phlébotome est le vecteur biologique de la forme promastigote extracellulaire et la forme amastigote intracellulaire évolue chez un hôte vertébré. La femelle phlébotome s'infeste lors du repas sanguin puis, suite à un ensemble de différenciations et multiplications, des formes promastigotes métacycliques infestantes sont produites au niveau du pharynx de la femelle qui pourra infecter un hôte mammifère lors de son repas de sang ultérieur. *Phlebotomus perniciosus* est le vecteur de l'espèce *Leishmania infantum* uniquement. En effet, ce protozoaire réalisant une partie de son cycle biologique au

sein de l'organisme du vecteur, une spécificité existe entre les espèces de phlébotomes et les espèces de leishmanies vectorisées (Kamhawi 2006).

De nombreuses espèces sont décrites comme hôtes et réservoirs de leishmanies. Les leishmanies infectent les carnivores (canidés, félidés), les primates dont l'Homme, les marsupiaux, les lagomorphes, les rongeurs, les chevaux et même les reptiles (Roque, Jansen 2014; Tsakmakidis et al. 2017). Cependant, le réservoir principal de ce parasite reste le chien à l'échelle mondiale (Alemayehu, Alemayehu 2017).

ii. Épidémiologie

La leishmaniose est une maladie mondialement répandue : en 2018, d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), près de 100 pays sont considérés comme endémiques pour la leishmaniose. Il y aurait plus de 1,3 millions de nouveaux cas par an dans le monde et ce chiffre serait sous-estimé à cause de l'absence de diagnostic ou de déclaration dans les pays ayant un faible accès aux soins (World Health Organization 2017). En France métropolitaine, dans les territoires à proximité de la mer Méditerranée, on retrouve uniquement la leishmaniose causée par *Leishmania infantum* et vectorisée par *Ph. perniciosus* et *Ph. ariasi* (Pasquier et al. 2021). Dans les années 1990, une recrudescence des cas de leishmaniose associée à l'apparition de co-infection avec le VIH a été observée. Depuis, en Europe, le nombre de cas diagnostiqués tend à diminuer mais la répartition géographique de ces cas s'étend (Desjeux 2001). En effet, des cas de leishmaniose sont rapportés dans des territoires de plus en plus au nord comme en Allemagne par exemple (Naucke et al. 2008). L'extension de la répartition géographique des cas de leishmaniose est en corrélation avec l'extension de la distribution géographique des phlébotomes (Desjeux 2001).

La leishmaniose canine est une maladie endémique dans une cinquantaine de pays. La majorité des cas répertoriés sont localisés en Europe, et notamment dans le bassin Méditerranéen, et en Amérique du Sud. Bien que 53 espèces de leishmanies aient été mises en évidence dans le monde, seulement 12 ont été identifiées chez le chien. Dont *L. infantum* qui est considérée comme la principale espèce responsable des cas de leishmaniose canine (Depaquit, Léger 2017). En France métropolitaine, la distribution des cas de leishmaniose canine est très hétérogène. Des foyers endémiques sont décrits dans les départements bordés par la Méditerranée et des

cas sont également rapportés hors de ces foyers dans le Nord et l'Ouest de la France (Le Rutte et al. 2021).

b. Vecteurs d'arbovirus

Phlebotomus perniciosus est un vecteur avéré du virus Toscana qui est le principal arbovirus vectorisé par les phlébotomes en France (Depaquit et al. 2010; Charrel 2012). Ce dernier possède un tropisme pour le système nerveux central et est parfois à l'origine de méningites et d'encéphalites. Dans la plupart des cas, les personnes atteintes souffrent d'un syndrome fébrile aigu pendant deux à sept jours. La résolution des symptômes ; tels que des céphalées, des malaises, de la fièvre, des nausées et des myalgies ; est spontanée (Charrel 2012). Le réservoir de ce virus n'est pas clairement identifié mais semble être le vecteur lui-même. Les phlébotomes s'infectent en prenant leur repas de sang sur des hôtes vertébrés (Depaquit et al. 2010; Bichaud et al. 2011).

D'autres *Phlebovirus* pouvant être transmis par *Ph. perniciosus* sont le virus Sicilien et le virus Naples identifiés pour la première fois en Italie et aujourd'hui rependus dans les pays du pourtour méditerranéen (Depaquit et al. 2010). Ils causent des symptômes modérément sévères en regard de ceux causés par le virus Toscana (Depaquit et al. 2010; Bichaud et al. 2011; Alkan et al. 2013). Le vecteur principal de ces virus est *Ph. papatasi*, d'où le nom commun de « fièvre à papatasi » ou « fièvre des trois jours » donnés au syndrome résultant de l'infection par l'un de ces virus.

Des individus *Ph. perniciosus* ont été identifiés comme porteur du virus Massilia en France et Arbia en Italie (Depaquit et al. 2010; Jancarova et al. 2019). Ces *Phlebovirus* ont une importance moindre en santé publique relativement aux virus cités ci-dessus.

Partie II : Synthèse bibliographique sur l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) et plus précisément les mécanismes d'apprentissages profonds sont couramment utilisés dans le domaine de la reconnaissance d'images. Après avoir défini les concepts d'intelligence artificielle, d'apprentissage automatique et profond, les différents types de réseaux de neurones et ceux particulièrement adaptés à la reconnaissance d'images seront définis dans cette partie.

A. Généralités sur l'intelligence artificielle

1. Une pluralité de définitions

L'intelligence artificielle est une discipline scientifique du domaine de l'informatique qui implique l'utilisation de machines afin de créer un processus intelligent avec un minimum d'intervention humaine (Hamet, Tremblay 2017). Ce terme regroupe une pluralité de définitions du fait de la forte évolution de ce concept au cours du temps. Il comprend dorénavant l'ensemble des idées permettant à une machine d'acquérir la capacité d'extraire des informations, de les enregistrer, de les traiter et d'utiliser le résultat de ces traitements. Il s'agit d'un dispositif s'imprégnant des processus cognitifs humains (Haiech 2020).

Le concept d'intelligence artificielle permet de rechercher des méthodes pour résoudre des problématiques à forte complexité logique ou algorithmique.

2. L'histoire de l'intelligence artificielle

La naissance du concept d'intelligence artificielle est associée à la mention des premiers robots. Ce terme est introduit dans la littérature en 1921 par l'écrivain Karel Capek dans son œuvre « Rossum's Universal Robots ». Cependant, la mention d'un automate aux traits humains créé par un ingénieur mécanique remonte au troisième siècle en Chine. Au XII^{ème} siècle, un inventeur musulman du nom d'Al- Jazari a conçu

un robot humanoïde capable de frapper deux cymbales tenues dans ses mains. De même, en 1495, Léonard de Vinci a mené une étude poussée de l'anatomie humaine lui permettant de mettre au point un robot capable de se lever, de s'asseoir, relever les bras ainsi que de bouger la tête et la mâchoire à l'aide d'un système de câbles et de poulies. De nombreux chercheurs en robotique se sont par la suite inspirés de ses schémas. Le premier automate à voir le jour a été créé par le français Jacques de Vaucanson au XVIII^{ème} siècle, il était capable de jouer 12 morceaux de musique différents. Deux siècles plus tard, en 1948, le premier robot automate électronique est créé par William Grey Water dans le but de démontrer le fonctionnement du cerveau humain (Hamet, Tremblay 2017).

En 1950, Alan Turing a développé le « Turing test » qui a pour but de différencier les machines des humains, et a soulevé la possibilité que des machines soient capables de développer un comportement humain et de réfléchir (Turing, Haugeland 1950).

C'est en 1955 que John McCarthy a donné une première définition de l'expression « intelligence artificielle » en tant que : la science et l'ingénierie de la fabrication de machines intelligentes. Ce dernier, à l'aide de ses collègues, a présenté la première conférence sur l'intelligence artificielle au Dartmouth College en 1956. Ce fût le point de départ de ce concept qui est devenu un cadre intellectuel pour la recherche et le développement informatique. Ce concept repose sur la conjoncture que l'ensemble des facultés cognitives peuvent être décrites avec une telle précision qu'il est possible de les reproduire à l'aide d'un ordinateur (Ganascia 2017). Durant les années suivantes, les capacités des ordinateurs pour résoudre de complexes problèmes mathématiques ont connu un essor (Hamet, Tremblay 2017; Mintz, Brodie 2019). Après une victoire aux échecs contre le champion du monde Garry Kasparov en 1989 ; c'est en 2016 que la première victoire d'une intelligence artificielle, Alpha Go, contre le champion du monde au jeu de go, témoignant du plus haut point de l'intelligence humaine, a eu lieu. Bien qu'apprendre les règles d'un jeu à une intelligence artificielle semble aisé, l'apprentissage autonome de l'optimisation du jeu pour aboutir à une victoire l'est moins (Valin 2019).

Aujourd'hui, l'IA est considérée comme une branche de l'ingénierie qui met en œuvre de nouveaux concepts et de nouvelles solutions afin de résoudre des défis complexes. Avec les progrès continus de la vitesse électronique, de la capacité et de la programmation logicielle ainsi que de la quantité croissante de données

disponibles, il s'agit d'un domaine en pleine expansion. En 2016, le Forum Économique Mondial a désigné l'IA comme l'une des 10 technologies émergentes les plus importantes (Hamet, Tremblay 2017).

3. Les domaines d'exploitation de l'intelligence artificielle

Le concept d'IA fait aujourd'hui partie de la société sous de nombreuses formes comme les assistants personnels (Siri, Alexa, Google assistant...), les transports en commun automatisés, l'aviation, les jeux vidéo ainsi que la médecine. Ce concept est omniprésent dans une multitude de domaines comme la politique, l'économie, la communication et bien d'autres (Mintz, Brodie 2019).

B. L'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique est un domaine d'application de l'intelligence artificielle permettant l'entraînement d'un modèle algorithmique à la réalisation d'une tâche précise tout en utilisant l'expérience acquise pour améliorer sa capacité à réaliser cette tâche.

1. Définition

L'apprentissage automatique, ou « *Machine Learning* », est la capacité d'un ordinateur d'apprendre par l'expérience ce qui consiste en la modification d'un processus suite à l'acquisition de nouvelles informations (Mintz, Brodie 2019). T.Mitchell a proposé la définition suivante de l'apprentissage automatique : « Un programme informatique est dit capable d'apprentissage à partir d'une expérience E dans le respect d'une classe de tâche T avec la mesure de performance P s'il accomplit la tâche T, mesurée par P, et améliorée par l'expérience E » (Mitchell 1997). L'expérience est modélisée par une base de données d'apprentissage que le modèle analyse. L'apprentissage de la tâche nécessite une fonction de coût qui est calculée à partir d'une base de données de test. Le modèle doit donc être capable, lors de l'étape d'apprentissage, de modifier ses paramètres à l'aide de la base de données d'apprentissage pour améliorer ses performances. La finalité du modèle est donc de

trouver la combinaison de ses paramètres qui permettra de minimiser la fonction de coût issue de la base de données test (Hardy 2019).

Le *Machine Learning* est représenté par des algorithmes mathématiques qui améliorent l'apprentissage par l'expérience. Il existe trois types d'algorithmes d'apprentissage automatique :

- Non supervisé : il s'agit de la capacité à trouver des modèles.
- Supervisé : ce sont des algorithmes de classification et de prédiction basés sur des exemples précédents.
- Par renforcement et apprentissage : qui consiste en l'utilisation de séquences de récompenses et de punitions pour former une stratégie d'opération dans un espace de problèmes spécifiques (Hamet, Tremblay 2017).

2. Les différents algorithmes de classification

Comme évoqué ci-dessus, il existe plusieurs algorithmes utilisés dans la classification et la reconnaissance d'objets à partir d'une image. La méthode de fonctionnement de chacun de ces algorithmes est exposée dans la partie suivante.

a. L'algorithme d'apprentissage

La classification d'objet repose sur des méthodes permettant de construire un modèle à partir de données tout en contrôlant la fiabilité du modèle ainsi que sa capacité d'adaptation face à de nouvelles situations. Cet apprentissage peut se faire de façon supervisée ou non (Dreyfus et al. 2011).

Pour construire un algorithme d'apprentissage, il convient tout d'abord d'identifier le problème d'apprentissage. La base de données est ensuite constituée et un choix pertinent de la représentation numérique de ces données est effectué. Le modèle est ensuite entraîné à partir de la base d'apprentissage et les paramètres du modèle utilisé sont ajustés. Enfin, une base de données test, disjointe de la base d'apprentissage, permet de tester les performances de l'algorithme (Dreyfus et al. 2011).

b. Les méthodes supervisées

L'apprentissage supervisé repose sur une base d'apprentissage constituée d'un ensemble de données étiquetées qui ont été préalablement associées à une classe par un être humain. A partir de cette base d'apprentissage, l'apprentissage supervisé permet d'établir une fonction de classement, qui en se basant sur la description d'une image permettra de lui attribuer une classe. L'apprentissage supervisé utilise donc des couples comprenant une entrée et une sortie appartenant à la base d'apprentissage afin d'associer une sortie appropriée à une entrée donnée (Dreyfus et al. 2011).

c. Les méthodes non supervisées

L'apprentissage non supervisé nécessite l'existence d'une base de données comprenant des éléments indifférenciés. Dans ce cas, les exemples d'apprentissage fournis se résument uniquement aux entrées.

Ce type d'apprentissage a pour but d'identifier une éventuelle tendance des données à être regroupées en classes sans *a priori* sur les données. Les classes sont alors construites de façon à maximiser la similarité intraclasse et minimiser celle interclasse (Dreyfus et al. 2011).

C. L'apprentissage profond

L'apprentissage profond, également appelé « *Deep Learning* » est un concept inclus dans celui de « *Machine Learning* ».

1. Définition

Le processus de *Machine Learning* (Figure 30) est basé sur un arbre de décision simple menant à une conclusion. Le *Deep Learning* (Figure 30) utilise quant à lui des algorithmes imitant le cerveau humain en utilisant et traitant plusieurs types de données puis en créant des modèles de réseaux de neurones utilisés afin de prendre une décision (LeCun, Ranzato 2015).

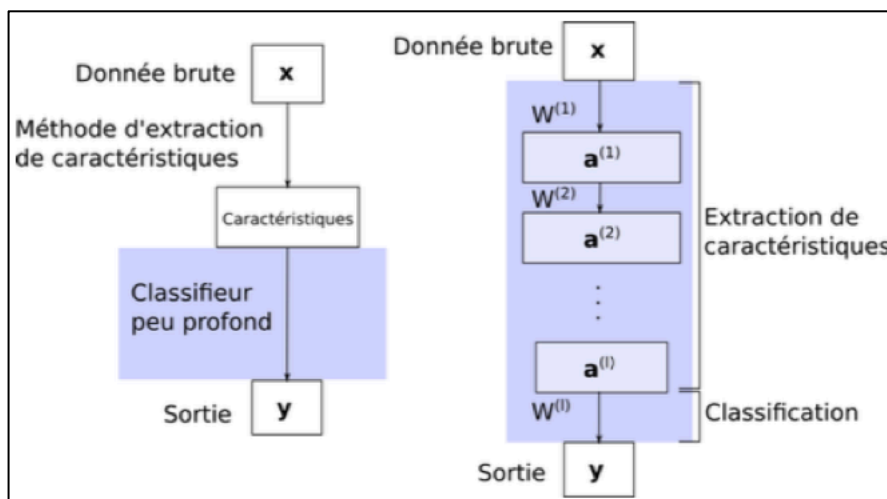


Figure 30 : Différence entre l'apprentissage automatique classique (à droite) et l'apprentissage profond (à gauche). La zone bleutée correspond à la zone d'apprentissage (Hardy 2019.)

Le *Deep Learning* permet aux modèles informatiques composés de plusieurs niveaux de traitement d'apprendre des représentations des données avec plusieurs niveaux d'abstraction. Ces méthodes ont considérablement amélioré les compétences en matière de reconnaissance de la parole, d'objets visuels, de détection d'objets et de nombreux autres domaines. Le *Deep Learning* utilise l'algorithme de rétropropagation pour indiquer à une machine la façon de modifier ses paramètres internes utilisés pour calculer la représentation dans chaque niveau en se basant sur la représentation issue du niveau précédent. Les réseaux convolutifs profonds ont permis des percées dans le traitement des images, de la vidéo, de la parole et de l'audio, tandis que les réseaux récurrents ont mis en lumière l'exploitation de données séquentielles telles que le texte et la parole (LeCun, Ranzato 2015).

L'apprentissage profond s'applique dans de nombreux domaines comme les nouvelles technologies de l'information et de la communication, comme la reconnaissance visuelle et vocale, la robotique, la bio-informatique, la reconnaissance d'objets, la sécurité, la santé (aide au diagnostic médical), etc... Il permet d'obtenir des résultats impressionnants dans des domaines divers et variés (Hardy 2019).

L'intérêt de l'apprentissage profond, notamment dans le domaine de l'analyse d'image, est la possibilité, lors de la première phase d'apprentissage, d'intégrer l'extraction de caractéristiques à partir des données brutes. Cette opération était préalablement réalisée à la main et demandait de solides connaissances ainsi qu'un travail d'ingénierie pour adapter les méthodes d'extractions (Hardy 2019).

2. Les différents type de réseaux de neurones

Un réseau neuronal est l'association de plusieurs neurones formels qui correspond à la représentation mathématique et informatique d'un neurone biologique.

Il existe de nombreux types de réseaux de neurones, correspondant aux divers objectifs de leur utilisation. Grâce à leurs capacités d'apprentissage, les réseaux de neurones permettent de découvrir des relations complexes non linéaires entre un grand nombre de variables, sans intervention externe.

a. Les réseaux de neurones artificiels

Il s'agit d'un réseau de neurones basés sur un modèle mathématique utilisant des outils de modélisation de données statistiques non linéaires. Les données d'entrée entretiennent des relations complexes avec les données de sortie. Les données entrées dans le réseau de neurones sont traitées par une série d'algorithmes. Puis, les données de sortie sont également traitées par un ensemble différent d'algorithmes afin d'obtenir les données finales. Les résultats d'une première couche de neurones servent d'entrées à la deuxième couche et ainsi de suite (Mintz, Brodie 2019).

Ce type de réseau de neurones correspond donc à une association en un graphique, d'objets élémentaires appelés neurones formels. La constitution du graphique, son niveau de complexité, les fonctions d'activation des neurones sont des exemples de critères qui permettent de caractériser les différents réseaux de neurones (Dreyfus et al. 2011).

b. Définition d'un neurone formel

Le neurone formel, ou perceptron, est une représentation mathématique et informatique d'un neurone biologique. Il possède différentes entrées, assimilables aux dendrites et une unique sortie correspondant à l'axone. Les coefficients numériques associés aux entrées jouent le rôle des actions excitatrices et inhibitrices des synapses.

Le premier neurone artificiel, équivalent à un neurone formel, a été créé en 1943 par Warren McCulloch et Walter Pitts qui ont publié un modèle mathématique et informatique inspiré d'un neurone biologique. Ce neurone possède une ou plusieurs entrées et une sortie binaire activée si ses entrées dépassent un certain seuil. Le « perceptron » est quant à lui inventé en 1957 par F. Rosenblatt et correspond à un neurone formel dont la fonction d'activation est une fonction échelon. Le perceptron accepte en entrée des nombres quelconque pondérés par un poids.

Ainsi, le neurone formel est l'unité élémentaire des réseaux de neurones artificiels au sein desquels une multitude de neurones formels sont associés (Dreyfus et al. 2011).

c. Les réseaux de neurones multi-couches

Les réseaux de neurones multicouches, ou perceptrons multi-couches (Multi Layers Perceptron ou MLP), ont été inventés en 1986. Ils sont composés d'une multitude de neurones interconnectés et organisés en couches successives (Figure 31). Chaque neurone de la première couche prend en entrées les données fournies au réseau de neurones. Chacune des couches suivantes reçoit en entrée les valeurs d'activation de la couche précédente. Ainsi, les valeurs d'activation de la dernière couche de neurones du réseau correspondent aux sorties du réseau. L'algorithme utilisé par les MLP pour mettre à jour les poids de chaque neurone de chaque couche afin de classifier au mieux une base de données est appelée la rétropropagation du gradient de l'erreur (Hardy 2019).

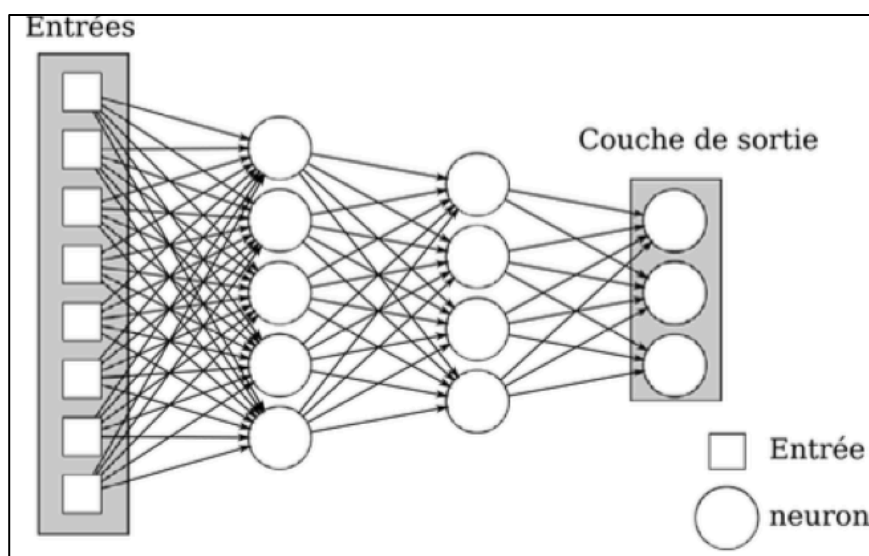


Figure 31 : Exemple de représentation d'un réseau de neurones multi-couches (Hardy 2019)

d. Les réseaux de neurones convolutifs

Les réseaux de neurones convolutifs (Convolution Neural Networks ou CNNs) sont un type particulier acyclique de réseaux de neurones artificiels (Figure 32). Ils sont basés sur des algorithmes de *Deep Learning* complexes composés de plusieurs étapes cachées pour analyser les données. Les neurones formels y sont agencés en analogie avec la formation du cortex visuel (Mintz, Brodie 2019).

La particularité de ces réseaux réside en l'utilisation d'une étape de convolution dans les premières couches intermédiaires du réseau de neurones. Le modèle apprend les filtres qui permettent la mise en évidence des motifs des données d'entrées. Un CNN est composé de quatre couches (LeCun et al. 1998; Albawi, Abed Mohammed, Alzawi 2017):

- Les couches convolutives contenant plusieurs opérations de convolutions appliquées à la même entrée ;
- Les couches d'opération de mise en commun qui regroupent les informations sur les neurones proches afin de réduire la dimension des couches de neurones ;
- Les couches d'activation qui sont semblables à un réseau de neurones multi-couches ;
- Et les couches toutes connectées permettant de corréliser l'ensemble des motifs issus des couches convolutives.

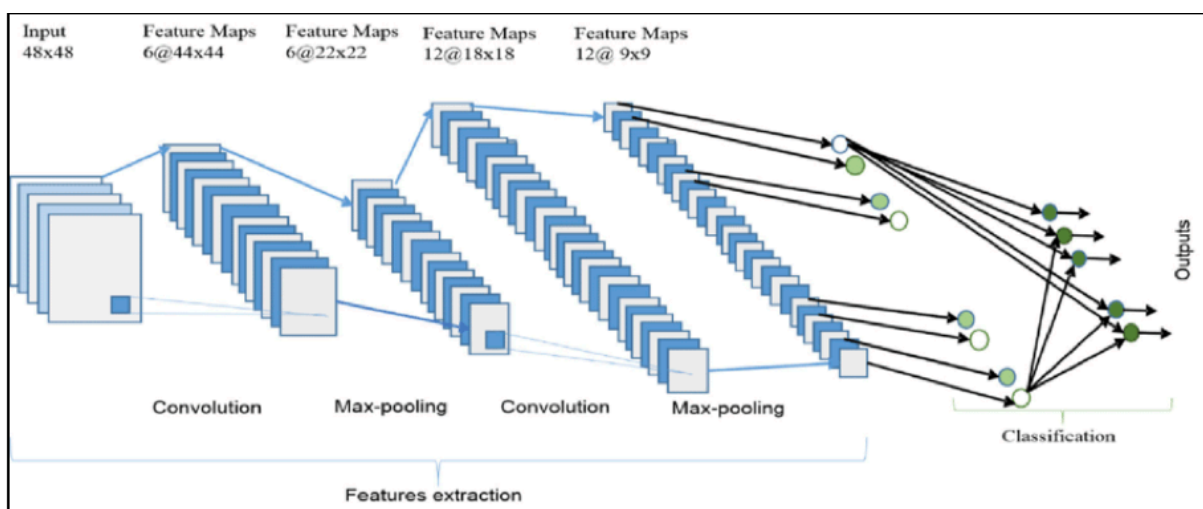


Figure 32 : Architecture globale d'un réseau de neurones convolutive (Alom et al. 2019)

Ce type de réseau de neurones est à ce jour le plus performant dans le domaine de la classification d'images (Szegedy et al. 2015; Krizhevsky, Sutskever, Hinton 2017).

e. Les réseaux de neurones récurrents

Les réseaux de neurones récurrents (Recurrent Neural Networks ou RNNs) permettent d'analyser des séquences de vecteurs. Les éléments obtenus en sortie sont réinjectés en entrée du réseau ou de la couche cachée (Dreyfus et al. 2011).

L'intérêt de ce type de réseau de neurones est qu'il conserve une temporalité pour chaque événement en entrée contrairement aux CNN utilisés pour faire ressortir des relations spatialement proches entre les données d'entrées. Ainsi il permet une analyse plus performante de séries temporelles et de données audio ou texte. Un réseau de neurones récurrent est composé de plusieurs couches de neurones caractéristiques connectées les unes aux autres. Une couche de neurones peut être décrite comme une couche toute connectée qui prend en entrée la couche précédente à l'instant t concaténée à sa sortie à l'instant $t-1$. Cette organisation nécessite que les informations soient gardées au cours du temps au sein des couches de neurones afin de donner un contexte aux données analysées (Hardy 2019).

3. Application à la reconnaissance d'images

Le *Deep Learning* tient son nom de la profondeur des réseaux neuronaux qu'il utilise. Ces derniers sont organisés en un très grand nombre de couches formées chacune d'un très grand nombre de neurones formels organisés. Cette organisation demande beaucoup de puissance de calcul et de mémoire mais permet au réseau d'apprendre des tâches très complexes comme la reconnaissance d'images.

a. Caractéristiques numérique d'une image

Pour un être humain, une image numérique ou imprimée est perçue de la même manière. Cette image ne nécessite que peu d'efforts pour son interprétation par un cerveau humain tant nous sommes habitués à analyser notre environnement.

Un ordinateur, quant à lui, est capable d'analyser des chiffres. Il décompose donc l'image en pixels qui correspondent à des carrés unicolores. Ces derniers sont la plus petite unité qui compose une image. Un pixel peut être de n'importe quelle couleur et pour se faire il comprend trois composantes : rouge, vert et bleu. Une valeur numérique entre 0 et 255, pour un codage sur 8 bits, est attribuée à chacune de ces composantes et l'ensemble définit une couleur unique. Si pour chaque couleur primaire cette valeur est égale à 0, alors le pixel sera de couleur blanche. De même, si les valeurs attribuées aux trois couleurs primaires sont chacune égales à 255, alors le pixel apparaîtra noir.

Une image est donc définie par la valeur de ces pixels ainsi que leurs dispositions spatiales pour un ordinateur. Elle est matérialisée par une matrice à trois dimensions dont le nombre de lignes correspond à la hauteur de l'image en pixels, le nombre de colonnes à la largeur de l'image et la profondeur à la valeur des trois composantes de chaque pixel.

b. Réseau de neurones adaptés

Le type de réseaux de neurones le plus adapté à la reconnaissance d'images est le réseau de neurones convolutif. La convolution est un outil mathématique qui agit comme un filtrage dans le cadre du traitement des images. Une fenêtre de taille définie parcourra toute l'image de gauche à droite et de haut en bas en se décalant d'un pas défini au préalable.

L'opération de convolution se servira des valeurs de chaque pixel pour former une carte de caractéristiques, de taille inférieure à l'image d'entrée, qui regroupe les caractéristiques de groupes de pixels adjacents. La convolution permet d'extraire des caractéristiques choisies de l'image. Il est possible d'appliquer plusieurs étapes de convolutions à une même image afin d'en extraire plusieurs caractéristiques distinctes. Ainsi, à la sortie de la partie convolution du réseau de neurones, un long vecteur qui comprend les caractéristiques pertinentes de l'image est créé.

Le principe de la convolution a pour avantage de réduire le nombre de poids à calculer par le modèle de classification en identifiant les caractéristiques pertinentes de l'image. Ainsi, la convolution permet de faciliter la classification d'images par le réseau de neurones.

c. Entraînement à la reconnaissance d'images

Le réseau de neurones convolutif non entraîné est assimilable à un humain n'ayant absolument aucune connaissance sur l'objet que l'on va lui présenter. Afin de lui apprendre à identifier un objet, il convient de lui présenter un maximum d'images différentes représentant l'objet afin de généraliser ce que l'on souhaite lui faire reconnaître.

i. La base de données

L'utilisation d'une base de données cohérente et utile, contenant les images des objets que l'on souhaite faire reconnaître à un réseau de neurones convolutif, est indispensable. Une partie de la base de données sert à entraîner le modèle, il s'agit de la base de données d'entraînement. Les images restantes sont utilisées pour évaluer le modèle et seront donc placées dans une base de données de test distincte de la base de données d'entraînement. Toutes les images utilisées doivent avoir été préalablement étiquetées et les objets présents sur ces images doivent appartenir à une classe identifiée (Simonyan, Zisserman 2015). Nous retrouvons ici le principe de l'apprentissage supervisé.

ii. L'apprentissage

Le réseau de neurones convolutif traite une image de la base de données d'entraînement puis émet en sortie une prédiction sur la classe à laquelle l'objet de l'image appartient. Comme l'ensemble des images a été préalablement classifié, le réseau peut vérifier la concordance de sa prédiction avec la classe réelle d'appartenance. Selon la véracité de ce résultat et par l'utilisation d'un algorithme connu sous le nom de rétropropagation du gradient de l'erreur, le réseau de neurones convolutif met à jour l'ensemble des coefficients le composant, également appelés poids. Ce processus est répété avec la totalité des images de la base d'entraînement. L'entraînement du réseau de neurones convolutif consiste donc à déterminer et calculer chacun de ses poids pour optimiser sa capacité à classifier des images.

Une fois la phase d'entraînement terminée, le modèle va être évalué grâce à la présentation de la base de données de test. Le réseau de neurones va classer les images de cette base de données et calculer son taux de réussite afin de déterminer sa précision.

Une fois le processus d'apprentissage achevé, trois situations se présentent :

- Le modèle est aussi performant sur les données d'entraînement que sur celles de test. Il s'agit du cas de figure idéal.
- Le modèle reconnaît très bien les images d'entraînement mais moins bien celles de test. Il s'agit d'un cas de surentraînement, le modèle n'arrive pas à généraliser son processus de classification d'images et il présente une faible capacité prédictive. Il convient d'enrichir la base de données d'entraînement ou bien d'utiliser un modèle moins complexe pour palier à cette situation.
- Le modèle a des difficultés à reconnaître les images d'entraînement ainsi que les images de test. C'est un cas de sous-apprentissage qui indique le modèle choisit ne convient pas ou est trop simple pour la tâche exigée (Simonyan, Zisserman 2015).

Partie III : Utilisation de l'apprentissage profond dans la reconnaissance de trois vecteurs d'intérêt médical et vétérinaire

L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité d'un réseau de neurone entraîné à distinguer les individus mâles et femelles de trois espèces d'insectes. Cette démarche a été réalisée dans le contexte général de la création d'une application de reconnaissance des insectes par photographie. Ainsi, les espèces d'insectes vectrices exposées en première partie de ce travail ont servi de support à la réalisation d'une banque de données regroupant plus de 60 000 images d'individus de ces trois espèces. Cette base de données a ensuite servi à l'apprentissage d'un réseau de neurones convolutif nommé Faster R-CNN. Cette partie présente les modalités de création de cette base de données et de l'entraînement de ce réseau de neurones ainsi que les résultats de cette démarche.

A. Création de la base de données photos

Comme évoqué dans la partie bibliographique sur l'intelligence artificielle, l'entraînement d'un réseau de neurones à la reconnaissance d'images nécessite le support de deux bases de données cohérentes, qualitatives et distinctes l'une de l'autre.

1. Matériel

a. Souches et espèces de moustiques et de phlébotomes utilisées

Le choix des espèces composant la base de données s'est fait sur leur disponibilités. En effet, les espèces *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus* et *Phlebotomus perniciosus* sont élevées au sein de l'insectarium du service de Parasitologie de l'ENVT. Les individus appartenant à ces souches d'élevages sont indemnes d'agents pathogènes et ne présentent donc pas de risque vectoriel.

De plus, ces espèces sont des centres d'intérêt majeurs pour la médecine vétérinaire et humaine comme présenté dans la partie bibliographique entomologique. Elles font l'objet de recherches approfondies et leur étude représente un enjeu considérable pour la santé publique.

Le choix de ces espèces a également été réalisé sur leur intérêt morphologique. Les individus *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* présentent des critères morphologiques proches. Leur différenciation par le réseau de neurones entraîné nous permettrait de déduire la finesse de sa classification. De même, les différences entre les individus mâles et femelles de chaque espèce sont subtiles. Les clichés des individus *Phlebotomus perniciosus*, de morphologie très différente, ont été utilisés afin d'évaluer si le réseau de neurones était capable de bien différencier deux individus aux morphologies bien distinctes.

b. Environnement de prise des clichés

Les photos utilisées pour constituer la base de données ont toutes été réalisées dans des conditions identiques. La pièce utilisée est la salle de travaux pratiques de parasitologie de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Des groupes allant de 10 à 14 individus de chaque espèce ont été placés :

- dans une cage de 20 cm de long, de large et de profondeur (Figure 33) dont les faces sont en toile de moustiquaire en polyester pour prendre en photos les individus des espèces *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus*.
- une cage de 15 cm de long, de large et de profondeur, en tissu a été utilisée pour les individus *Ph. perniciosus*.

Les photographies ont été réalisées en introduisant le smartphone directement à l'intérieur de chaque cage.

Un même lot d'individus pouvait être utilisé jusqu'à trois jours de suite. Afin d'assurer leur survie, de l'eau et du miel ont été placés dans chaque cage pour subvenir aux besoins physiologiques des moustiques et phlébotomes.



Figure 33 : Cage utilisée pour photographier les moustiques du genre *Aedes* (Photographies originales).

c. Appareil photo utilisé

L'iPhone 11 possède un double appareil photo permettant de capturer des images de 12 Mégapixels soit une définition de 4000 par 3000 pixels. Le premier objectif, avec une ouverture de $f/1,8$, est un objectif grand angle composé de six éléments. Ces éléments assimilables à des lentilles accroissent la qualité de l'image et en renforcent le contraste. Le second est un objectif ultra grand angle composé de cinq éléments qui possède une ouverture de $f/2,4$ et un champ de vision de 120° .

Le zoom optique de cet appareil agrandit jusqu'à deux fois la taille de l'image avant que celle-ci ne soit envoyée au capteur et ne résulte donc pas en la perte de détail. Le zoom numérique quant à lui recadre la partie centrale de l'image reçue par le capteur de l'appareil photo. Il permet un agrandissement pouvant aller jusqu'à cinq fois la taille de l'image mais engendre une perte de détails.

Cet appareil comprend également une stabilisation optique et automatique de l'image.

Les photographies ont été prises en format HEIC, qui est un format propre aux appareils Apple. Ce dernier permet de conserver une excellente qualité de l'image tout en minimisant son poids. Les photographies ont donc été réalisées dans ce format afin de faciliter la manipulation de ce nombre important de fichiers. Elles ont par la suite été converties au format PNG qui est plus universel et qui permet la lecture

des photographies par tous les appareils ainsi que leur utilisation lors des manipulations informatiques permettant la création d'une intelligence artificielle.

2. Méthode

a. Durée de la constitution de la base de données

Les photographies ont toutes été réalisées entre le 27 septembre et le 19 octobre 2021. Elles ont été prises, comme évoqué précédemment, avec l'appareil photo de l'iPhone 11 introduit directement dans une cage contenant les individus à photographier.

Les 52 782 photographies ont été réalisées espèce par espèce. Les clichés des individus *Ae. aegypti* ont été pris entre le 27 septembre et le 5 octobre, ceux de l'espèce *Ae. albopictus* entre le 7 et le 13 octobre et ceux de l'espèce *Ph. perniciosus* entre le 14 et le 19 octobre. Un tri des clichés a été effectué en parallèle de cette étape afin d'assurer un nombre de clichés, de bonne qualité et représentatifs de chaque espèce, suffisant pour la constitution de la base de données.

b. Paramètres environnementaux de la prise des clichés

La salle de travaux pratiques de parasitologie comporte de nombreuses fenêtres. Les clichés ont donc été pris à la lumière naturelle du jour et au même endroit de la pièce afin d'avoir une luminosité suffisante et sensiblement proche pour l'ensemble des clichés. La température dans la pièce est restée stable à 21°C pendant toute la durée de la constitution de la base de données.

Le fond visible sur les photos correspond aux paillasses de la salle qui sont en carrelage blanc.

c. Paramètres photographiques utilisés

Une combinaison du zoom optique et du zoom numérique afin d'obtenir un zoom X 4 a été utilisée pour la capture des photographies composant la banque de

données. Le choix de ce zoom permet d'obtenir des photographies assez précises des individus et de visualiser leurs caractéristiques morphologiques en détail.

Ci-dessous, la figure 33 récapitule l'ensemble des paramètres utilisés pour réaliser les photographies :

- La dimension correspond au nombre de pixels que comprennent la hauteur et la largeur de l'image.
- La résolution représente la densité de pixels sur une longueur donnée. Dans ce cas, l'image comprend 72 pixels par longueur de pouce.
- L'espace colorimétrique est un modèle mathématique tridimensionnel représentant l'ensemble des couleurs perceptibles par un appareil. Ainsi chaque couleur est définie par ses coordonnées correspondant à la valeur associée aux couleurs primaires RGB (Red, Green et Blue) dans ce cas.
- Le profil de couleur Display P3 est associé à un large espace de couleurs qui présente des couleurs rouge et verte plus vives. C'est un profil utilisé sur la majorité des appareils de type Smartphone.
- L'indice d'ouverture correspond à la quantité de lumière qui entre dans l'appareil photo par le réglage du diamètre de l'ouverture de l'objectif. C'est un paramètre réglé automatiquement dans le cadre de ce travail en fonction de la luminosité de l'environnement et de la distance de l'objet à photographier. Il est en lien avec le numéro F étant de f/1,8 dans ce cas. Il correspond à une grande ouverture du diaphragme de l'appareil photo.
- Le temps d'exposition est la durée pendant laquelle l'obturateur de l'appareil photo laisse passer la lumière lors d'une prise de vue. Il est dans ce cas d'un centième de seconde.
- La longueur focale dépend de l'appareil photo utilisé. Elle correspond à la distance entre la lentille de l'appareil photo et l'endroit où les rayons lumineux convergent pour former une image nette. Elle est dans ce cas inhérente à l'appareil photo de l'iPhone 11.
- La vitesse ISO reflète la sensibilité du capteur de l'appareil photo. Plus cette valeur est basse, plus le capteur nécessitera la présence de lumière pour créer une image. Il s'agit d'un paramètre réglé de façon automatique.
- La balance des blancs, ici réglée automatiquement, permet d'adapter la dominance de couleur à l'éclairage afin d'obtenir des couleurs fidèles à la réalité.

Créé le	28 septembre 2021 à 09:48
Modifié le	28 septembre 2021 à 09:48
Contenu créé	28 sept. 2021 à 09:28
Dimensions	3024 x 4032
Résolution	72 x 72
Espace colorimétrique	RGB
Profil de couleur	Display P3
Marque du périphérique	Apple
Modèle du périphérique	iPhone 11
Indice d'ouverture	1,696
Temps d'exposition	1/100
Longueur focale	4,25 mm
Vitesse ISO	64
Flash	Non
Numéro F	f/1,8
Programme d'exposition	Normal
Type de mesure	Motif
Balance des blancs	Automatique

Figure 34 : Paramètres photographiques des clichés réalisés.

d. Gestion des individus photographiés

Sept lots d'individus, ce qui correspond à 78 individus, ont été utilisés pour réaliser plus de 60 000 photographies. Les mêmes lots d'insectes ont été utilisés pendant deux à trois jours consécutifs. En effet, passé ce délai, certains individus n'étaient plus viables. Le but de la base de données réalisée étant de regrouper des clichés d'individus vivants dans différentes postures et sous différents angles, un nouveau lot était alors sélectionné.

Les lots de moustiques du genre *Aedes* étaient composés de dix individus, cinq mâles et cinq femelles, alors que ceux de l'espèce *Ph. perniciosus* regroupaient sept mâles et sept femelles. En effet, les individus de cette dernière espèce étant de taille plus petite, il était plus facile de les photographier avec une densité d'individus plus importante au sein de la boîte.

Une fois le lot utilisé, les individus étaient tués par immersion dans de l'eau, puis éliminés dans des bacs DASRI.

Le tableau suivant regroupe le nombre de lots utilisé par espèce ainsi que les dates d'utilisation.

Lot	Date	Nombre de moustiques	Espèces
1	27-28/09/2021	10 (5 mâles et 5 femelles)	<i>Aedes aegypti</i>
2	29-30/09/2021 – 1/10/2021		
3	4-5/10/2021		
4	7-8/10/2021	10 (5 mâles et 5 femelles)	<i>Aedes albopictus</i>
5	11-12-13/10/2021		
6	14-15/10/2021	14 (7 mâles et 7 femelles)	<i>Phlebotomus perniciosus</i>
7	18-19/10/2021		

Figure 35 : Tableau descriptif des lots d'individus utilisés pour la réalisation des photographies composant la banque de données.

3. Résultats

a. Nombre de photos réalisées

Plus de 10 000 photos des individus de chacune des six catégories (mâles et femelles des trois espèces) ont été prises. Trois lots de cinq femelles et cinq mâles de l'espèce *Ae. aegypti* ont été nécessaires pour réaliser plus de 20 000 photos des individus de cette espèce alors que deux lots de cinq femelles et cinq mâles de l'espèce *Ae. albopictus* ont été suffisants. Pour l'espèce *Ph. perniciosus*, deux lots comprenant sept femelles et sept mâles ont été photographiés. Cette différence de nombre de lots nécessaire pour prendre 10 000 photos de chaque catégorie est due à l'acquisition d'expérience dans la prise de clichés. Le premier lot a servi de test concernant les paramètres de l'environnement et de l'appareil photo à utiliser.

Le tableau suivant détaille le nombre de clichés d'individus de chaque catégorie réalisés par lot.

Lot	Espèces	Nombre de photos mâles par lot	Nombre total de photos mâles par espèce	Nombre de photos femelles par lot	Nombre total de photos femelles par espèce	Nombre total de photos par espèce
1	<i>Aedes aegypti</i>	1 919	1 919	1 612	1 612	3 531
2		5 951	7 870	6 698	8 310	16 180
3		2 468	10 338	1 893	10 203	20 541
4	<i>Aedes albopictus</i>	4 715	4 715	5 363	5 363	10 078
5		5 592	10 307	4 768	10 131	20 438
6	<i>Phlebotomus perniciosus</i>	5 516	5 516	4 585	4 585	10 101
7		6 061	11 577	6 621	11 206	22 783

Figure 36 : Tableau présentant le nombre de photographies d'individus mâles et femelles de chaque espèce par lot.

Les images ont été classées en six catégories différentes correspondant aux trois espèces étudiées divisées chacune en deux catégories correspondant aux deux sexes. Ce rangement par catégories a permis de manipuler plus aisément ce grand nombre d'images pour la suite du processus.

b. Aperçu des clichés

Les clichés ont été réalisés avec pour vocation de photographier les individus sous tous les angles afin d'obtenir une diversité de données la plus large possible ainsi qu'un aperçu complet de la morphologie des individus de chaque catégorie. Les photographies obtenues sont toutes de dimension 3024 par 4032 pixels et sont en noir et blanc.

Ci-dessous, une image d'un individu de chaque catégorie est présentée afin de donner un aperçu de la qualité des photographies obtenues.

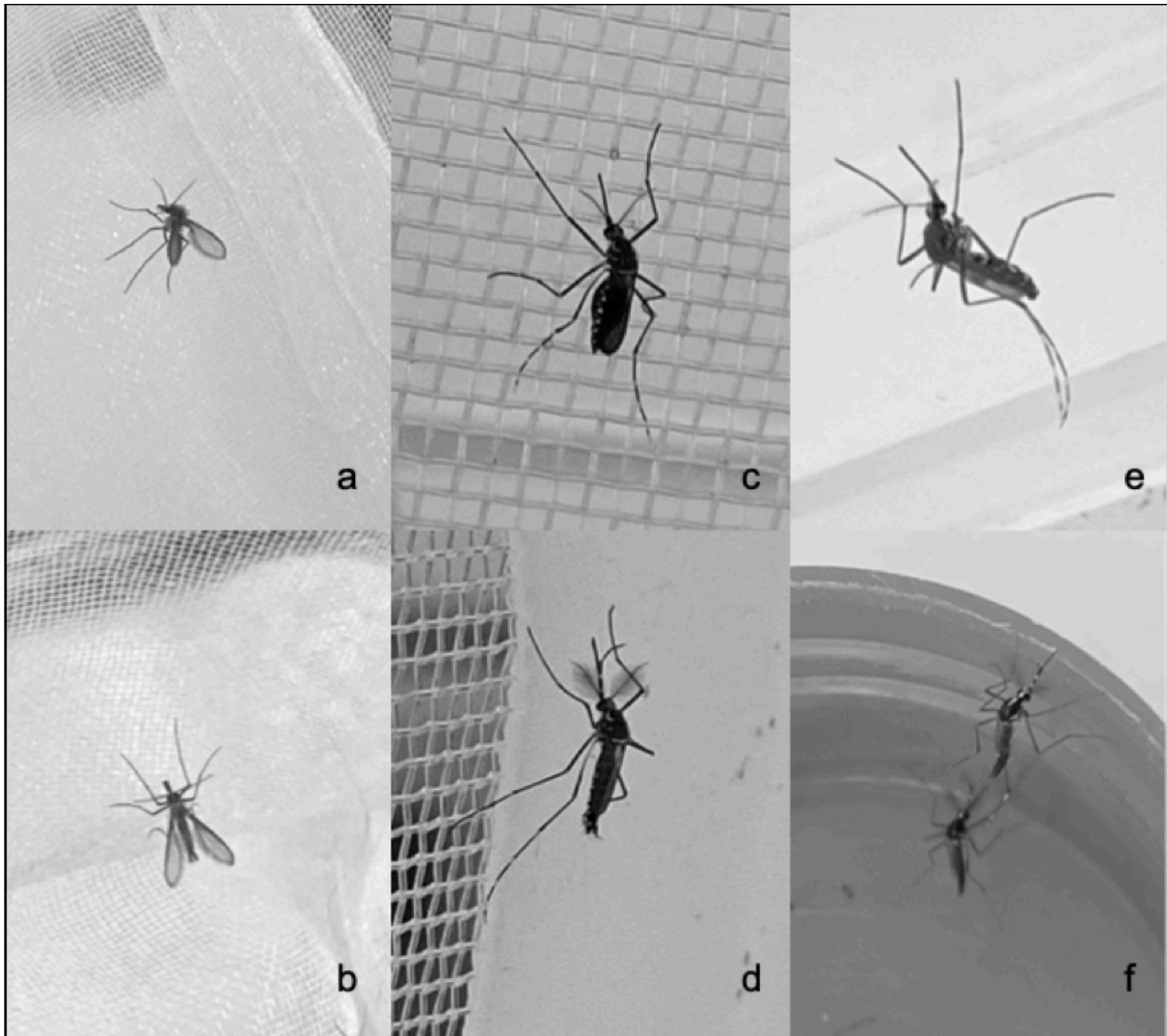


Figure 37 : Photographies des différents individus avec en a) une femelle *Phlebotomus perniciosus*, en b) un mâle *Phlebotomus perniciosus*, en c) une femelle *Aedes aegypti*, en d) un mâle *Aedes aegypti*, en e) une femelle *Aedes albopictus* et en f) un mâle *Aedes albopictus* (photographies originales).

B. Mise en forme des données

Afin d'être exploitable par le réseau de neurones Faster R-CNN, les données photographiques ont tout d'abord été converties au format PNG avant d'être labellisées à l'aide du logiciel Labellmg. Les images ont ensuite été réparties en deux banques de données : une destinée à l'entraînement du réseau de neurones et l'autre pour tester le modèle issu de cet entraînement. Deux fichiers RECORD regroupant les images ainsi que les informations liées à la classe des individus photographiés ont été créés par la suite pour servir de support au réseau de neurones.

1. Conversion vers un format « .png »

Les photographies ont été enregistrées dans un premier temps dans le format HEIC, comme expliqué précédemment. En effet, ce format est plus optimisé car il permet de conserver une excellente qualité d'image tout en réduisant leur poids par rapport à des formats de stockage classiques comme PNG et JPEG. Le transfert des images du téléphone vers un ordinateur ainsi que le tri de ces images et leur classification ont pu être réalisés plus aisément sous ce format moins lourd.

Cependant, pour la suite de la constitution d'une base de données adaptée à l'entraînement d'un réseau de neurones, le format HEIC ne convenait plus. En effet, le logiciel utilisé pour la labellisation des données, Labellmg, ne fonctionne qu'avec des images de format plus standard PNG ou JPEG. Il a donc été décidé de convertir l'ensemble des images au format PNG.

Cette opération a été réalisée grâce à une ligne de code utilisée dans le terminal de l'ordinateur sur lequel les images étaient enregistrées. Ainsi, catégorie par catégorie, les images ont été dupliquées et converties au format PNG puis enregistrées dans un nouveau dossier. Cette opération a permis d'obtenir le même nombre d'images PNG dans un dossier différent de celui d'origine mais avec la même organisation en six catégories, sans modifier le dossier initial.

2. Labellisation des données

a. Le logiciel Labellmg®

L'étiquetage des images, ou « *Data Labelling* », est une étape indispensable préalablement à l'entraînement d'un réseau de neurones à la reconnaissance d'objets. Les données ainsi étiquetées sont annotées pour présenter la cible afin que le modèle d'apprentissage apprenne qu'il s'agit de la réponse attendue lors de la présentation d'une image similaire.

Cette étape est réalisable manuellement par une personne appelée « *Data Labeler* » ou humain dans la boucle. Dans le cadre de cette thèse, l'ensemble des images a été annoté manuellement à l'aide du logiciel Labellmg®, qui est une

référence en termes d'étiquetage d'images. Labellmg® est un logiciel gratuit, d'utilisation publique, codé en langage python.

b. Méthode

Pour utiliser le logiciel Labellmg®, il faut tout d'abord importer la base de données à étiqueter dans le logiciel. Ensuite, ce dernier permet de créer un rectangle ajusté autour d'un élément identifié. Une même image peut être le support d'un ou plusieurs éléments à identifier et donc contenir un ou plusieurs rectangles.

Il convient ensuite de donner un label à l'élément sélectionné. Dans le cadre de cette thèse, les labels ont été données aux éléments identifiés comme décrit dans le tableau ci-dessous.

Espèces	Sexe	Label
<i>Aedes aegypti</i>	Femelle	class1
	Mâle	class2
<i>Aedes albopictus</i>	Femelle	class3
	Mâle	class4
<i>Phlebotomus perniciosus</i>	Femelle	class5
	Mâle	class6

Figure 38 : Tableau des labels utilisés pour chaque catégorie d'individus.

Les images labellisées sont ensuite enregistrées dans un dossier spécifié, dans ce cas correspondant au même dossier contenant les données, et un fichier de type XLM correspondant à chaque image est créé dans ce dossier.

Cette étape de labellisation a également permis d'effectuer un deuxième tri concernant les clichés réalisés. En effet, certaines images comprenaient des individus non repérés auparavant et ces derniers ont donc été labellisés afin qu'ils soient pris en compte dans l'entraînement du réseau de neurones. A l'inverse, certaines photographies qui n'étaient pas d'assez bonnes qualités ont été éliminées à cette étape.

La figure 38 donne un aperçu de l'interface du logiciel Labellmg® avec une photographie contenant deux phlébotomes femelles appartenant donc à la class5.

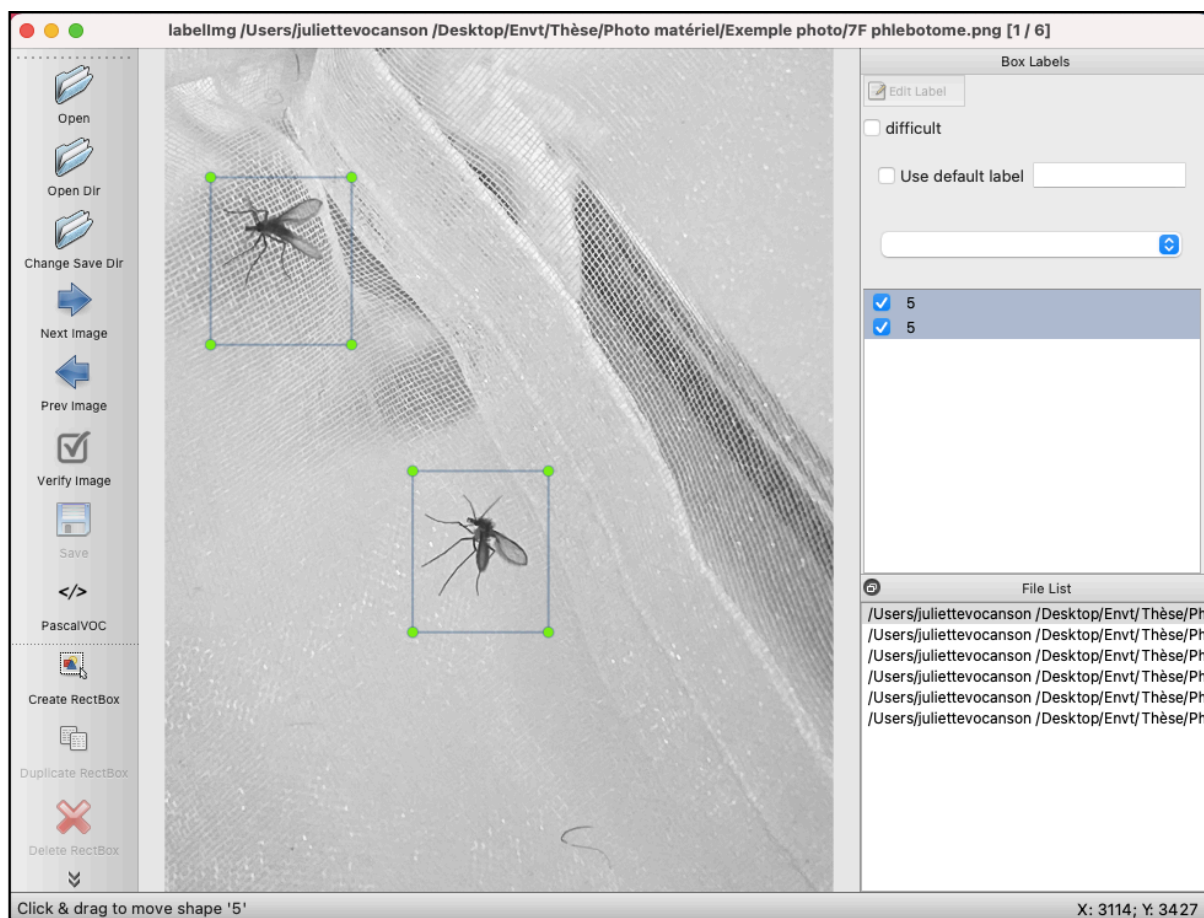


Figure 39 : Aperçu de l'interface du logiciel Labellmg (Photographie originale).

c. Exemple d'images labellisées

La figure 39 présente les mêmes images que sur la figure 36 mais après l'étape de labellisation avec le logiciel Labellmg®.

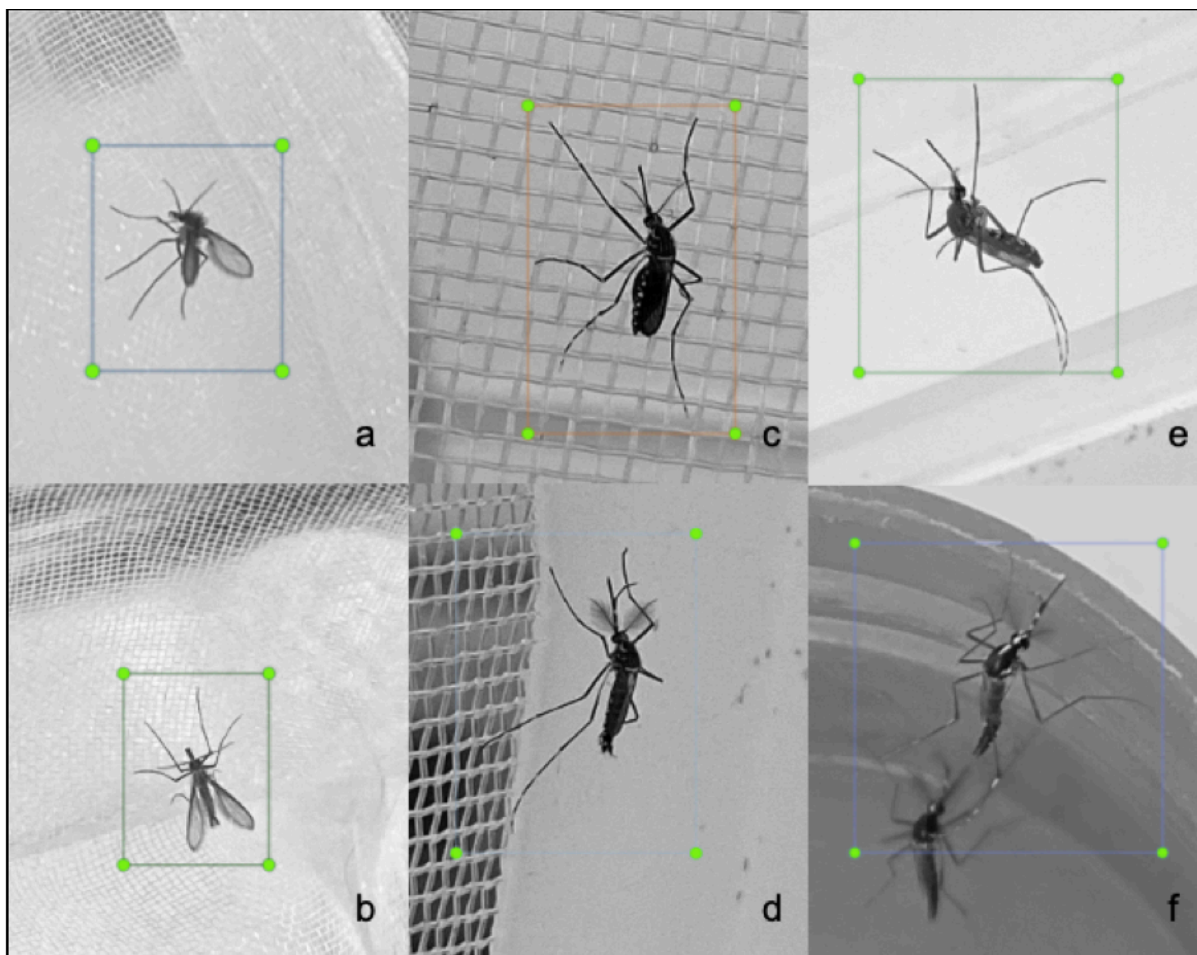


Figure 40 : Photographies labellisées des différents individus avec en a) une femelle *Phlebotomus perniciosus*, en b) un mâle *Phlebotomus perniciosus*, en c) une femelle *Aedes aegypti*, en d) un mâle *Aedes aegypti*, en e) une femelle *Aedes albopictus* et en f) un mâle *Aedes albopictus* (Photographies originales).

d. Création de fichiers de format « .xml »

Les fichiers de type XML créés à l'issue de l'étape de labellisation contiennent les informations suivantes :

- Le nom du fichier d'origine de la photographie, le nom de la photographie ainsi que son chemin d'accès ;
- Les informations concernant la taille de l'image soit sa longueur, sa largeur et sa profondeur ;
- Les coordonnées des extrémités des rectangles créés autour des éléments à identifier ainsi que la classe à laquelle ces éléments appartiennent, il y a autant de rectangles que d'éléments à identifier.

L'organisation d'un fichier XML correspondant à une image contenant deux individus femelles de l'espèce *Ph. perniciosus* est présentée à l'aide de la figure 41.

Les informations contenues par ces fichiers vont par la suite être mise en commun afin de créer les deux bases de données « Train » et « Test » qui vont servir de support au réseau de neurones.

```
▼<annotation>
  <folder>2 femelles</folder>
  <filename>7F phlebotome.png</filename>
  ▼<path>
    /Volumes/JULIETTE/Thèse/Photos/PNG/Phlebotomus perniciosus/2 femelles/7F phlebotome.png
  </path>
  ▼<source>
    <database>Unknown</database>
  </source>
  ▼<size>
    <width>3024</width>
    <height>4032</height>
    <depth>1</depth>
  </size>
  <segmented>0</segmented>
  ▼<object>
    <name>5</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>0</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    ▼<bndbox>
      <xmin>1121</xmin>
      <ymin>1913</ymin>
      <xmax>1735</xmax>
      <ymax>2642</ymax>
    </bndbox>
  </object>
  ▼<object>
    <name>5</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>0</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    ▼<bndbox>
      <xmin>207</xmin>
      <ymin>585</ymin>
      <xmax>845</xmax>
      <ymax>1342</ymax>
    </bndbox>
  </object>
</annotation>
```

Figure 41 : Organisation d'un fichier XML (Photographie originale).

3. Création de fichiers « .csv »

a. Méthode

Il a tout d'abord fallu répartir les images en deux banques de données indépendantes et représentatives :

- La banque de données « Train » composée de 70% des images ;
- La banque de données « Test » comportant les 30% des images restant.

La répartition des images a été faite de façon aléatoire au sein de chaque catégorie afin de garantir l'obtention de deux banques représentatives de façon équivalente. De

ce fait les deux banques comprennent chacune le même ratio de photographies de chaque catégorie d'individus.

Le sigle CSV, qui signifie « *Comma-Separated Values* », désigne un fichier informatique de type tableur dont les valeurs sont séparées par des virgules. Il s'agit d'un format utilisé majoritairement pour l'importation ou l'exportation de bases de données car il permet de fusionner de grandes quantités de données sans les connecter les unes aux autres. Ce format convient donc pour manipuler des données structurées simples.

Dans le cadre de cette thèse, un fichier CSV correspondant à chacune des deux bases de données « train » et « test » ont respectivement été générés. Pour créer ces deux fichiers, le script python « `xml_to_csv.py` » a été utilisé. Ce dernier est composé de différentes boucles permettant d'aller chercher les fichiers XML au sein des dossiers « Train » et « Test » et d'en extraire les informations suivantes : « filename », « width », « height », « class », « xmin », « ymin », « xmax », « ymax ». Ces informations sont placées dans un tableau qui contient une ligne par éléments identifié contenu dans chacune des deux bases de données. Ainsi, quand une image est le support d'un seul élément identifié, elle donne lieu à la création d'une seule ligne dans le fichier CSV. Cependant, quand plusieurs éléments identifiés sont contenus par une même image, plusieurs lignes avec la même information dans la colonne « *filename* » sont générées.

b. Format des données

Les deux fichiers CSV créés se nomment respectivement « `train_labels.csv` » pour celui correspondant à la banque de données « Train » et « `test_labels.csv` » pour la banque de données « Test ». Le fichier CSV correspondant au dossier « Train » comporte 44 730 lignes soit le même nombre d'individus identifié pour 36 546 images. Celui du dossier « Test » présente les informations concernant 20 508 individus identifiés appartenant à 16 236 photographies.

Un extrait du fichier « `test_labels.csv` » est présenté en Figure 42. Il comprend les 30 premières lignes de ce fichier correspondant toutes à la labellisation d'images contenant des individus femelles *Ae. aegypti*. La première colonne correspond au nom de l'image sur laquelle se trouve l'élément identifié. La deuxième colonne et la troisième indiquent respectivement la largeur et la longueur de l'image. La quatrième colonne contient la classe à laquelle l'objet identifié appartient. Et enfin les quatre

dernières colonnes indiquent les coordonnées du rectangle créé autour de l'objet identifié afin de le localiser.

filename	width	height	class	xmin	ymin	xmax	ymin	ymax
7134 F aegypti .png	4032	3024	class1	1428	762	2512	1974	
7135 F aegypti .png	4032	3024	class1	1432	566	2460	1798	
7136 F aegypti .png	4032	3024	class1	1404	818	2424	2054	
7137 F aegypti .png	4032	3024	class1	1336	862	2360	2106	
7138 F aegypti .png	4032	3024	class1	1352	854	2384	2058	
7139 F aegypti .png	4032	3024	class1	1456	1338	2564	2694	
7140 F aegypti .png	4032	3024	class1	1492	1206	2592	2466	
7141 F aegypti .png	4032	3024	class1	1600	1074	2560	2402	
7142 F aegypti .png	4032	3024	class1	1604	910	2680	2218	
7143 F aegypti .png	4032	3024	class1	1752	1686	2840	2938	
7144 F aegypti .png	3024	4032	class1	1473	1732	2316	2747	
7145 F aegypti .png	3024	4032	class1	1359	1661	2259	2761	
7146 F aegypti .png	3024	4032	class1	1326	1704	2202	2785	
7147 F aegypti .png	3024	4032	class1	1702	1966	2678	3166	
7148 F aegypti .png	3024	4032	class1	1454	1723	2468	2908	
7149 F aegypti .png	3024	4032	class1	1478	1613	2430	2799	
7150 F aegypti .png	3024	4032	class1	1464	1561	2445	2770	
7151 F aegypti .png	3024	4032	class1	1364	1623	2316	2775	
7152 F aegypti .png	3024	4032	class1	1430	223	2159	1108	
7153 F aegypti .png	3024	4032	class1	1192	1432	1830	2327	
7154 F aegypti .png	3024	4032	class1	1345	1637	2321	2818	
7155 F aegypti .png	3024	4032	class1	1416	1647	2421	2889	
7156 F aegypti .png	3024	4032	class1	1506	1666	2492	2818	
7157 F aegypti .png	3024	4032	class1	1216	66	1916	975	
7158 F aegypti .png	3024	4032	class1	1468	1666	2459	2856	
7159 F aegypti .png	3024	4032	class1	1283	1737	2311	2885	
7160 F aegypti .png	3024	4032	class1	1283	1704	2368	2918	
7161 F aegypti .png	4032	3024	class1	1576	190	2692	1430	
7162 F aegypti .png	3024	4032	class1	935	2175	1664	3327	

Figure 42 : Extrait du fichier "test_labels.csv" (Photographie originale).

4. Création de fichiers « .record »

La dernière étape de mise en forme des données consiste en la création de deux fichiers « .record » : l'un correspondant à la base de données Train et l'autre à la base de données Test. Ces fichiers ont été créés respectivement à partir des dossiers Train et Test contenant les différentes photographies et des fichiers CSV correspondants créés précédemment.

Le script « generate_tfrecord.py » a été utilisé afin de construire ces deux fichiers. Il permet de joindre par concaténation au sein d'un même fichier l'ensemble des images respectives des dossiers Test ou Train avec les informations générées suite à l'étape de labellisation contenues dans les fichiers CSV.

A l'issue de cette étape, un fichier « test.record » contenant l'ensemble des images du dossier Test et des informations concernant les objets identifiés dont elles sont le support est créé. De même un fichier « train.record » correspondant à la base de données Train est formé. Ces deux fichiers sont le support utilisé pour l'entraînement du réseau de neurones par la suite.

C. Lancement de l'apprentissage et du test du réseau de neurones

Une fois les deux banques de données prêtes à être utilisées, l'entraînement du réseau de neurones Faster R-CNN a été lancé sur la plateforme Colaboratory®. L'avancement de l'entraînement a pu être suivi grâce à la fonction « *Board* » proposée par cette plateforme. Le modèle ainsi entraîné a ensuite été extrait afin d'être testé par une photographie n'appartenant à aucune des deux bases de données et nous avons été confronté à une erreur informatique à ce stade que nous n'avons pas réussi à surmonter.

1. Matériel

a. Utilisation de l'interface Google Drive®

Google Drive® est un service de stockage et partage de fichiers appartenant à la société Google®. Ce serveur existe depuis 2012. Les documents qui y sont stockés peuvent être récupérés, modifiés et utilisés à tout moment et n'importe où moyennant une connexion internet. Google Drive® permet également de faciliter le travail collaboratif en offrant un accès simultané aux fichiers à différents utilisateurs.

Dans le cadre de cette thèse, Google Drive® a été utilisé pour servir de stockage aux deux bases de données créées afin de les avoir à disposition pour la suite du processus d'apprentissage du réseau de neurones. L'ensemble des scripts python et fichiers nécessaires et générés par l'apprentissage du réseau de neurones ont également été stockés sur ce serveur.

b. Utilisation de l'environnement Colaboratory®

Colaboratory® ou Colab® est un service hébergé de notebooks Jupyter appartenant à Google Research®. Par le biais du navigateur, il permet d'écrire et exécuter des scripts python et d'accéder à des ressources informatiques. L'ensemble des notebooks Colab® utilisés sont stockés sur Google Drive®, ce qui facilite leur partage lors de travaux collaboratifs. Cette plateforme permet notamment d'entraîner des modèles d'apprentissage automatique directement dans le cloud sans nécessiter d'installation préalables sur un ordinateur.

Au vu du nombre important de photographies et de fichiers associés à traiter dans les bases de données élaborées au cours de cette thèse, la version Pro de Colaboratory® a dû être utilisée. Cette version permet d'avoir accès à des GPU (Graphics Processing Unit), qui sont des cartes graphiques et visent à optimiser le rendu d'images, et TPU (Tensor Processing Unit), qui sont des circuits intégrés spécifiques aux applications et qui permettent d'accélérer les charges de travail de *Machine Learning*.

La bibliothèque informatique utilisée lors de ce travail de thèse est TensorFlow. Il s'agit d'une bibliothèque open source de *Machine Learning*, créée par Google®, permettant de développer et d'exécuter des applications de Machine Learning et de *Deep Learning*. TensorFlow regroupe un grand nombre de modèles et d'algorithmes de Machine Learning et de Deep Learning. Ce dernier repose sur le langage de programmation Python, tandis que l'exécution de ces applications s'effectue en C++ haute-performance.

c. Utilisation du réseau de neurones « Faster R-CNN »

Le réseau de neurones Faster R-CNN a été utilisé dans le cadre de cette thèse. Ce réseau spécialisé dans la détection d'objets est composé de deux parties. Le premier module, le réseau de proposition de région (Région Proposal Network ou RPN), est un réseau de type convolutif qui sélectionne des régions d'intérêt sur les images utilisées. Le deuxième module comprend le détecteur Fast R-CNN qui utilise les régions précédemment isolées pour y détecter des objets (Ren et al. 2017).

Le réseau de proposition de région commence par l'introduction d'une image d'entrée, qui est d'abord redimensionnée, dans le réseau convolutif de base. Ce RPN va ensuite placer des ancres aux endroits d'intérêts sur l'image afin d'indiquer la présence possible d'un objet à identifier. Le réseau va ensuite se déplacer à travers chaque pixel de la carte d'entités de sortie afin de déterminer si les ancres placées

correspondent bien à des objets et affiner les coordonnées de ces ancres afin d'identifier des cadres correspondants à des propositions d'objets. Une fonction de perte permet de sélectionner les ancres qui sont placées sur des zones d'intérêts et d'éliminer celles incorrectement placées. Une série de traitement des ancres ainsi que l'attribution de coefficient de régression sont ensuite appliquées pour favoriser une localisation précise. Ainsi, seules les propositions cohérentes et avec une chance maximale de contenir un objet à détecter sont retenues pour la suite du processus d'apprentissage.

Le détecteur Fast R-CNN est également composé d'un réseau de neurones convolutifs comprenant une couche de mise en commun du retour sur investissement et de couches entièrement connectées. Viennent ensuite deux branches pour la classification et la régression de la boîte englobante contenant la proposition. Ainsi l'image d'entrée passe d'abord par le réseau convolutif qui permet d'obtenir la carte des caractéristiques. Ensuite les propositions issues du RPN sont utilisées au niveau de la couche de mise en commun du retour sur investissement (ROI Pooling) afin d'extraire une information de sortie de taille fixe contenant les caractéristiques de l'images et le nombre de proposition. Après avoir traversé les deux couches entièrement connectées, les caractéristiques sont introduites dans les branches de classification et de régression afin d'obtenir des scores de classification. Ces derniers reflètent la probabilité qu'une proposition appartienne à chaque classe. Les coefficients de la couche de régression sont utilisés pour améliorer les boîtes englobantes contenant les différentes propositions (Ren et al. 2017).

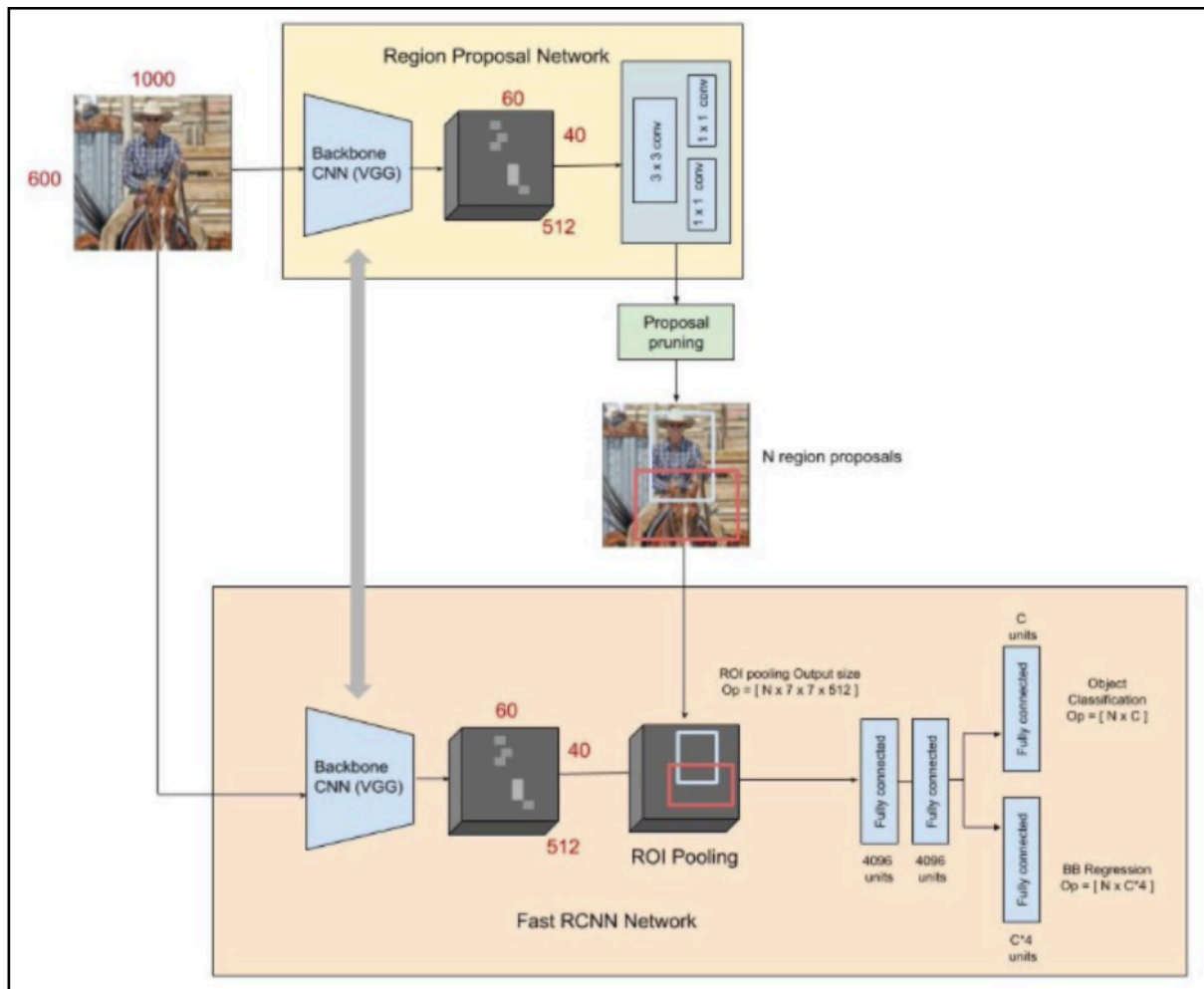


Figure 43 : Schéma d'organisation du réseau de détection Faster R-CNN : le RPN pour les propositions de régions et Fast R-CNN en tant que détecteur (source : <https://towardsdatascience.com/faster-r-cnn-for-object-detection-a-technical-summary-474c5b857b46>).

2. Méthode

a. Choix des paramètres d'entraînements

Tout d'abord, un fichier texte nommé « labelmap » a permis d'exprimer les six classes différentes d'individus présents sur les photographies et d'associer le nom de chaque classe à son label issu de l'étape de labellisation.

Un fichier texte de configuration « pipeline.config », équivalent au fichier de configuration du modèle « faster_rcnn_inception_v2_pets.config », a quant à lui permis de fixer les paramètres d'entraînement utilisés par le réseau Faster R-CNN. Ce fichier contient :

- Le nombre de différentes classes, équivalent à six dans ce cas ;

- Une étape de calibrage des images, avec une dimension minimale de 500 pixels et maximale de 1000 pixels ;
- Une fonction d'augmentation de données permettant de démultiplier le nombre d'images utilisées par le réseau en effectuant une rotation à 90°, un Flip horizontal ou vertical et un changement de couleur au sein de l'échelle des gris ;
- Les paramètres permettant de créer les points d'ancrage, avec notamment une taille de 128 par 128 pixels pour ces derniers, les différents ratios entre leurs longueur et largeur allant de 0,125 à 4,0 ainsi que le nombre de pixels entre chaque ancre qui est de 32 ;
- Les caractéristiques de la fonction de perte utilisée par le RPN, avec un maximum de 64 propositions par image et un seuil à 0,7 pour sélectionner les ancres intéressantes ;
- Les caractéristiques de fonctionnement du détecteur Fast R-CNN, avec un maximum de proposition à 16 et un seuil plus large à 0,45 pour affiner la sélection des différentes propositions ;
- Les paramètres de configuration de l'entraînement, avec l'utilisation d'un taux d'apprentissage d'abord grossier afin de lancer l'entraînement puis de plus en plus fin après respectivement 200 000, 300 000 et 600 000 itérations.

Le choix des différents paramètres a été réalisé en fonction de ce qui paraissait le plus pertinent par rapport au format de la banque de données créée et du résultat souhaité. L'objectif étant dans un premier temps de réaliser l'apprentissage du réseau de neurones afin d'évaluer la possibilité de reconnaître les différents individus, aucune recherche sur l'optimisation de ces paramètres n'a été réalisée au cours de ce projet. Cet aspect de l'entraînement d'un réseau de neurones pourrait faire l'objet de futures recherches.

b. Programme utilisé

Une fois les différents paramètres fixés, l'apprentissage du réseau de neurones est lancé par le programme python « train.py ». Pour chaque étape, une ligne de texte contenant l'heure, le numéro de l'étape, la valeur de la fonction de perte ainsi que la durée de l'étape apparaît comme illustré sur la figure suivante. On peut donc lire, par

exemple, que l'étape 3 513 a duré 0,535 secondes et que la fonction de perte avait pour valeur 0,0203 lors de cette étape.

```
!python3 train.py --logtostderr --train_dir=training/ --pipeline_config_path=training/faster_rcnn_inception_v2_pets.config
I0523 14:45:31.405244 140552760002432 learning.py:507] global step 3512: loss = 0.0010 (0.461 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3513: loss = 0.0203 (0.535 sec/step)
I0523 14:45:31.941464 140552760002432 learning.py:507] global step 3513: loss = 0.0203 (0.535 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3514: loss = 0.0124 (0.529 sec/step)
I0523 14:45:32.471153 140552760002432 learning.py:507] global step 3514: loss = 0.0124 (0.529 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3515: loss = 0.0079 (0.536 sec/step)
I0523 14:45:33.007719 140552760002432 learning.py:507] global step 3515: loss = 0.0079 (0.536 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3516: loss = 0.0039 (0.530 sec/step)
I0523 14:45:33.538395 140552760002432 learning.py:507] global step 3516: loss = 0.0039 (0.530 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3517: loss = 0.0018 (0.536 sec/step)
I0523 14:45:34.074821 140552760002432 learning.py:507] global step 3517: loss = 0.0018 (0.536 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3518: loss = 0.0047 (0.530 sec/step)
I0523 14:45:34.605532 140552760002432 learning.py:507] global step 3518: loss = 0.0047 (0.530 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3519: loss = 0.0039 (0.533 sec/step)
I0523 14:45:35.139056 140552760002432 learning.py:507] global step 3519: loss = 0.0039 (0.533 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3520: loss = 0.0057 (0.539 sec/step)
I0523 14:45:35.678945 140552760002432 learning.py:507] global step 3520: loss = 0.0057 (0.539 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3521: loss = 0.0012 (0.537 sec/step)
I0523 14:45:36.217225 140552760002432 learning.py:507] global step 3521: loss = 0.0012 (0.537 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3522: loss = 0.0056 (0.530 sec/step)
I0523 14:45:36.747832 140552760002432 learning.py:507] global step 3522: loss = 0.0056 (0.530 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3523: loss = 0.0031 (0.539 sec/step)
I0523 14:45:37.287614 140552760002432 learning.py:507] global step 3523: loss = 0.0031 (0.539 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3524: loss = 0.1122 (0.528 sec/step)
I0523 14:45:37.816439 140552760002432 learning.py:507] global step 3524: loss = 0.1122 (0.528 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3525: loss = 0.0014 (0.542 sec/step)
I0523 14:45:38.359797 140552760002432 learning.py:507] global step 3525: loss = 0.0014 (0.542 sec/step)
INFO:tensorflow:global step 3526: loss = 0.0050 (0.538 sec/step)
I0523 14:45:38.898541 140552760002432 learning.py:507] global step 3526: loss = 0.0050 (0.538 sec/step)
```

Figure 44 : Extrait de l'apprentissage du réseau de neurones Faster R-CNN en cours (Photographie originale).

Au fur et à mesure que l'apprentissage se poursuit, la valeur de la fonction de perte diminue et tend vers zéro. La durée de chaque étape dépend quant à elle de l'efficacité des GPU et TPU utilisés pour faire fonctionner le réseau de neurones.

c. Format des données obtenues en sortie

Des points de contrôle sont présents toutes les 1 000 étapes environ. A chacun de ces points, trois fichiers contenant l'avancée de l'entraînement du réseau de neurones à cette étape sont créés et enregistrés dans un fichier « training » se trouvant sur l'espace Google Drive®. Ces fichiers de sauvegarde se présentent sous la forme « model.ckpt-X », X étant le numéro de l'étape correspondant au point de contrôle. Un fichier de type « .index », un autre « .meta » et un dernier fichier de type « .data » sont créés. Ces fichiers contenant des informations au format binaires sont des sauvegardes consécutives de l'état du réseau de neurones au cours de l'avancée de son apprentissage. Ils ne sont pas destinés à être ouverts ou consultés directement.

3. Visualisation de l'avancé de l'apprentissage

a. TensorBoard

L'outil TensorBoard (Figure 45) appartenant à l'environnement Collaboratory® a été utilisé afin de visualiser l'avancée de l'apprentissage du réseau de neurones. Il s'agit de l'outil de visualisation des données produites par TensorFlow. Il permet entre autres, via sa fonction Scalars, d'obtenir des graphiques représentant le taux d'apprentissage, la fonction de perte du RPN et du détecteur Fast R-CNN concernant la classification, celles concernant la localisation, ainsi que la fonction de perte totale au cours de l'avancé des étapes de l'apprentissage. Cet outil a permis de décider à partir de quelle étape le réseau de neurones était suffisamment entraîné et ne faisait plus de progrès dans la précision de la classification et de la localisation des objets à identifier. La stabilisation de la fonction de perte dans les différents domaines est le facteur qui permet d'affirmer que l'entraînement est terminé ou bien que le modèle subît un surentrainement exprimé par une augmentation des valeurs de la fonction de perte après sa stabilisation.

TensorBoard permet également d'afficher un graphique conceptuel de la structure du modèle qui par son analyse permet de comprendre comment le modifier afin d'améliorer l'entraînement de ce dernier.

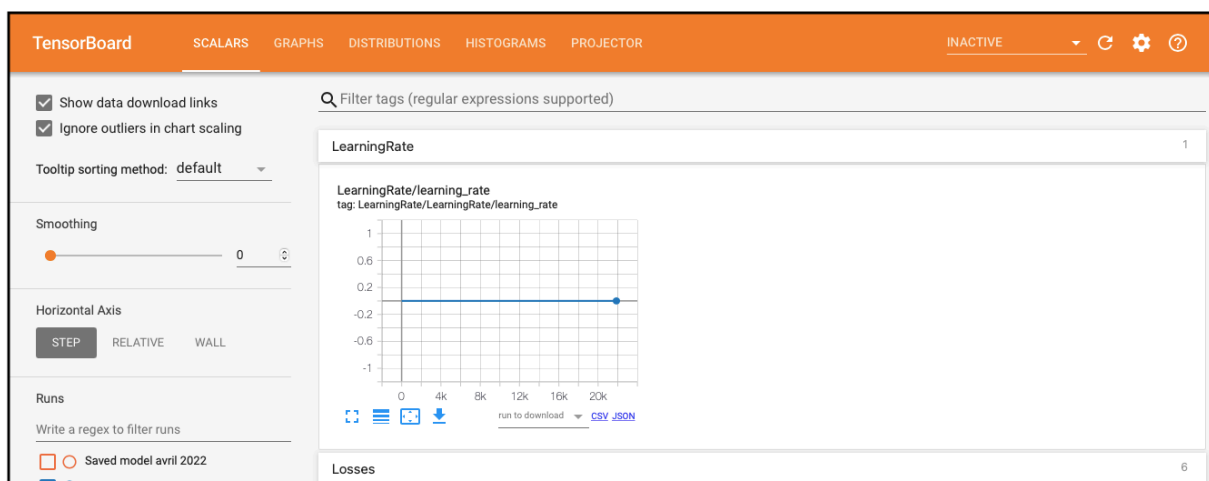


Figure 45 : Interface TensorBoard sur Collaboratory avec comme exemple le graphique du taux d'apprentissage en fonction de l'avancé de l'entraînement (Photographie originale).

b. Exemple de graphiques obtenus

Les graphiques présentés correspondent aux 20 000 premières étapes de l'entraînement du modèle. On observe sur les graphiques suivant que plus l'entraînement du modèle progresse, plus les différentes fonctions de perte tendent vers zéro. Ceci signifie que le modèle devient de plus en plus performant pour localiser ainsi que classifier les objets identifiés.

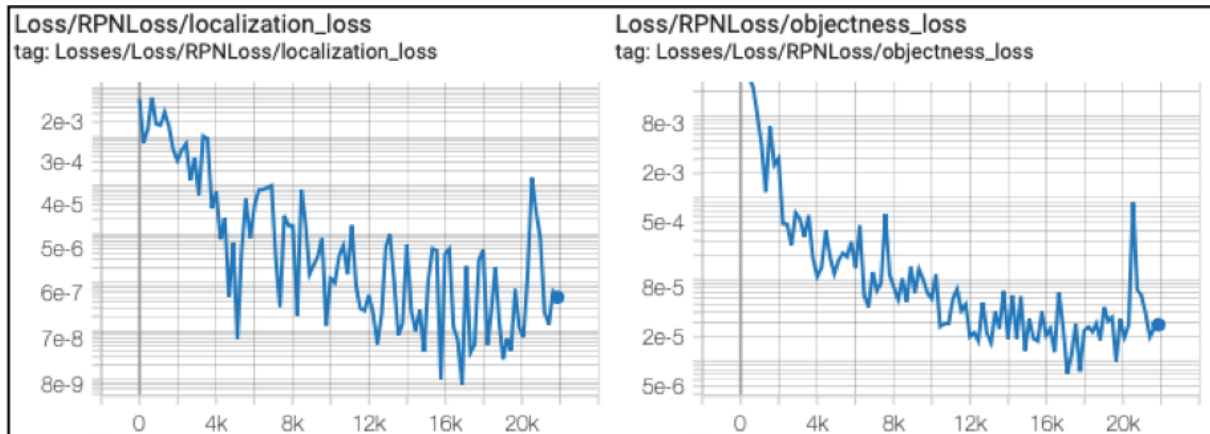


Figure 46 : Graphique de la fonction de perte propre au RPN concernant la classification (à gauche) et la localisation (à droite) (Photographie originale).

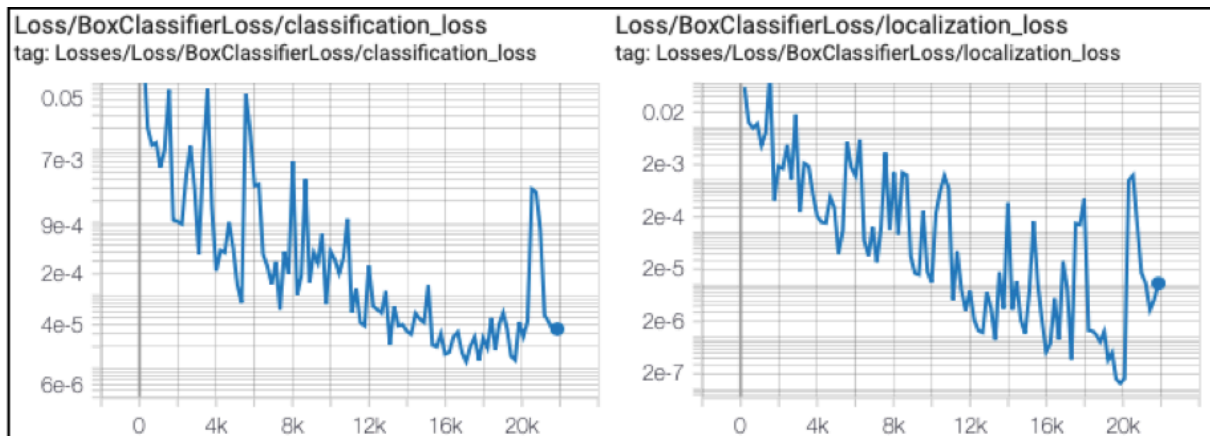


Figure 47 : Graphique de la fonction de perte propre au détecteur Fast R-CNN concernant la classification (à gauche) et la localisation (à droite) (Photographie originale).

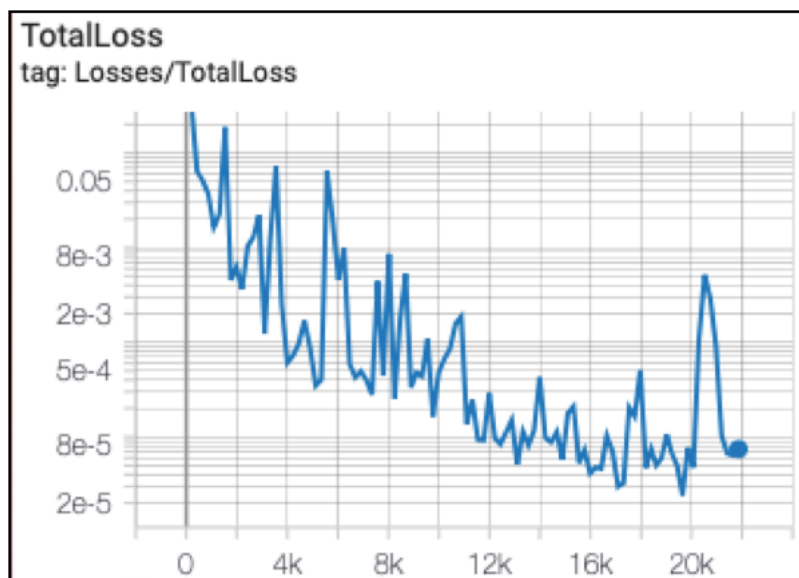


Figure 48 : Graphique de la fonction de perte globale du modèle (Photographie originale).

Dans ce travail de thèse, la réalisation d'un premier entraînement comprenant plus de 700 000 itérations avait permis la stabilisation de la fonction de perte globale dont le résultat tendait vers 0,6 sans évolutions majeures après 200 000 itérations. Ce résultat suggère que le modèle évolue que très peu après l'étape 200 000. Il a alors été décidé d'essayer de confronter ce modèle avec une photographie inconnue n'appartenant à aucune des deux banques de données.

4. Export du graphique d'inférence

a. Méthode

Une fois l'entraînement du modèle de détection d'objets achevé, un graphique d'inférence est exporté à partir du dernier point de sauvegarde réalisé. Le script Python « export_inference_graph.py » permet ainsi de préparer un graphique Tensorflow de détection d'objet pour l'inférence à l'aide du fichier de configuration du modèle « faster_rcnn_inception_v2_pets.config » et d'un point de contrôle formé de format « model.ckpt-X », où X correspond au numéro de la dernière étape réalisée au cours de l'apprentissage.

b. Résultat

Ce script génère un graphique d'inférence, des fichiers de points de contrôle associés, un graphique d'inférence sauvegardé et une sauvegarde du modèle.

Le graphique d'inférence contient un nœud d'entrée qui correspond à un tenseur contenant quatre informations. Les tenseurs sont des éléments à plusieurs dimensions qui contiennent des données qui sont dans la majorité des cas sous forme numériques. Ainsi, un tenseur à une dimension est plus communément appelé vecteur, de même qu'un tenseur de dimensions 2 s'apparente à une matrice.

Ce graphique présente également les informations de sortie suivantes sous forme de différents tenseurs de type float 32, ce qui signifie qu'ils contiennent des variables à virgule flottante avec la valeur du nombre et un exposant indiquant l'amplitude du nombre :

- « num_detection » est un tenseur qui spécifie le nombre de fenêtre de sélection valides par image dans le lot ;
- « detection_boxes » contient les différentes fenêtres d'intérêt détectées ;
- « detection_scores » présente les scores associés à chaque classe pour les différents objets détectés ;
- « detection_classes » est porteur des classes affectées aux objets détectés.

Le graphique d'inférence ainsi produit est ensuite utilisé dans l'étape suivante afin de tester le modèle avec une image jusqu'alors inconnue et non labellisée.

5. Test du réseau de neurones avec une image inconnue

a. Méthode

Le script Python « detection_test.py » utilise le modèle sauvegardé du graphique d'inférence issu de l'étape précédente ainsi que le fichier « labelmap.pbtxt » contenant les différentes catégories d'objets à identifier afin d'analyser une image inconnue au modèle. Cette image contenant un ou plusieurs objets à détecter n'a pas été utilisée préalablement pour entraîner le réseau de neurones et n'a pas été labellisée. Ce programme permet donc de confronter cette image au modèle issu du réseau de neurones entraîné et de tester sa capacité à reconnaître un élément qu'il a été entraîné à identifier.

b. Résultat

Pour chaque image, le programme affiche le nombre d'objets identifié, la classe de ces derniers ainsi que le score de détection associé à chaque classe. Il permet donc de déterminer la classe d'appartenance la plus probable et la précision de la détermination de cette classe.

Dans le cadre de cette thèse, lors de la réalisation de cette étape, nous avons été confrontés à une erreur informatique de type :

« tensorflow.python.framework.errors_impl. Invalid Argument Error : Incompatible shapes : [X] vs. [Y] », où X et Y sont des entiers positifs. Cette erreur semble indiquer une incompatibilité de forme entre deux éléments non identifiés.

Malgré différents essais pour tenter de résoudre cette erreur, aucune origine n'a pu être décelée et aucun résultat n'a donc pu être obtenu. Un essai a consisté à entraîner un modèle avec un lot d'image de taille plus petite à celle utilisée pour former les banques de données de base. Cet essai s'est avéré infructueux et a eu pour seule conséquence de modifier les valeurs des entiers positifs contenus dans le message d'erreur.

Partie IV : Discussion

L'ensemble de la démarche réalisée dans le cadre de ce projet ayant été présentée, l'éclaircissement du contexte ainsi que l'exposition de pistes d'améliorations sont maintenant présentés au cours de cette discussion.

A. Contexte de ce projet

Ce travail de thèse s'inscrit dans le projet plus vaste de la création d'une application qui a pour vocation d'attribuer une espèce et un sexe à un insecte pris en photo. Cette application accessible à tous serait basée sur un modèle de reconnaissance d'objets s'appuyant sur un réseau de neurones entraîné et donc sur le principe de l'intelligence artificielle.

1. La possibilité de création d'une application de reconnaissance d'insectes

Ainsi, ce travail avait pour vocation de créer une banque de données photographiques conséquente et qualitative utilisée dans un second temps pour être le support de l'entraînement d'un réseau de neurones de type Faster R-CNN pour la reconnaissance de trois espèces d'insectes vectrices d'intérêt médical et vétérinaire. Le processus présenté, s'il avait pu aboutir, aurait pu servir de base à ce projet d'application et aurait pu être étendu à d'autres espèces d'insectes.

De précédentes études sur la reconnaissance d'espèces de moustiques ayant recours à l'apprentissage profond ont été réalisées par le passé. Elles ont montré l'efficacité de l'utilisation de l'apprentissage profond dans la reconnaissance d'espèces avec des caractéristiques morphologiques proches. En revanche, deux de ces études ont été réalisées à partir de banque de données photographiques d'individus morts, suite à différentes étapes de congélation et séchage et le matériel de photographie utilisé était plus performant qu'un Smartphone (Park et al. 2020; Ong et al. 2021). La troisième étude s'est intéressée à la possibilité d'utiliser des photographies prises par un Smartphone d'individus vivants et a montré l'importance de l'utilisation de systèmes d'augmentation des données pour augmenter la précision de la classification du réseau de neurones (Okayasu et al. 2019). Ces trois études se

sont également limitées à des banques de données contenant respectivement 3 000 (Park et al. 2020), 4 120 (Ong et al. 2021) et 14 400 (Okayasu et al. 2019) photographies d'individus, ce qui reste inférieur à celle constituée dans ce travail de thèse.

Une application similaire pour l'identification des différentes espèces de tiques existe dans le milieu vétérinaire et est uniquement accessible aux praticiens. Il s'agit de Tickit®, une application créée par le laboratoire MSD Santé Animale début 2021 dans le cadre de l'initiative européenne *ProtectOurFutureToo* qui étudie les changements climatiques et l'impact sur les animaux de compagnie. Cette application permet de photographier les tiques croisées au cours de consultations afin d'alimenter une base de données regroupant plus de 30 pays et en retour d'identifier l'espèce de tiques présentée et ainsi de mieux appréhender le risque parasitaire pour l'animal hôte (MSD Santé Animale France 2021).

En s'inscrivant dans la même optique que cette dernière application, l'accès à tous à la possibilité d'identifier un insecte par une simple photographie permettrait d'alimenter une base de données considérable qui servirait dans de multiples domaines.

2. Utilisation des données récoltées

L'utilisation des données générées par l'utilisation d'une telle application pourrait avoir un intérêt majeur dans de nombreux domaines. En effet, à chaque fois qu'un utilisateur capture en photo un insecte, l'espèce et le sexe de ce dernier ainsi que la localisation et la date de la photographie seraient relevés. L'étude de ces informations pourrait présenter un réel soutien dans les domaines présentés ci-après par exemple.

a. En épidémiologie et santé publique

Un des domaines d'application important de la collecte d'une telle quantité de données est l'épidémiologie et plus précisément son application dans la santé publique. En effet, comme exposé dans la partie bibliographique sur l'entomologie, les espèces étudiées au cours de ce travail de thèse présentent des répartitions géographiques qui évoluent rapidement en parallèle des changements climatiques

(Medlock et al. 2014; Kraemer et al. 2019). Le suivi de cette évolution en temps réel serait envisageable avec les données générées par les utilisateurs d'une application de reconnaissance des espèces par photographie. Il convient que pour avoir une interprétation fiable de ces données, il faudrait qu'un nombre conséquent d'utilisateurs participent au fonctionnement de l'application.

De plus, les stratégies de contrôle de ces espèces nécessitent une connaissance précise de leur répartition géographique et du lieu de développement des différents stades de développement. Les données collectées par une telle application permettraient de mettre en évidence l'introduction d'espèces invasives dans de nouvelles zones géographiques et d'appréhender précisément la répartition géographique d'une espèce donnée. La pulvérisation d'insecticide pourrait ainsi être ciblée aux zones géographiques adéquates contenant le plus grand nombre d'individus et aux stades les plus sensibles (Maroli et al. 2010). En résumé, une connaissance précise de la répartition géographique des espèces ciblées est un paramètre important dans la mise en place des stratégies de lutte intégrées dans un plan de contrôle global des espèces vectrices (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations 2019; Sharma, Singh 2008).

Cette application constituerait donc un outil important dans la gestion des agents pathogènes vectorisés par les Diptères présentés au cours de ce travail, mais également pour les autres espèces vectrices qui pourraient être répertoriées dans le futur.

b. En écologie

L'écologie est un concept qui vise à assurer un meilleur équilibre entre l'homme et son environnement afin de protéger ce dernier. Il repose sur l'étude des rapports entre les êtres vivants d'un environnement donné et leur milieu de vie. Les insectes faisant partie intégrante d'un écosystème quel qu'il soit, une meilleure connaissance des rapports entretenus entre les différentes espèces d'insectes et leur milieu permettrait une meilleure gestion de ces derniers.

c. Au sein des différents systèmes de production agro-alimentaire

Les différentes productions agro-alimentaires, qu'elles reposent sur l'élevage ou la culture, utilisent des plans de lutte contre les nuisibles afin d'améliorer leurs systèmes de production. Qu'ils parasitent le bétail, soient vecteurs d'agents pathogènes ou bien détruisent les cultures, l'identification des espèces auxquelles appartiennent ces insectes permettrait d'envisager des mesures de lutte adaptées à chaque exploitation. Chaque agriculteur possédant l'application serait en mesure de connaître les espèces d'insectes présentes sur son exploitation et ainsi d'utiliser les produits chimiques adaptés, de manière raisonnée pour traiter ses cultures ou ses animaux. En ciblant les espèces à contrôler, une lutte globale s'appuyant sur différents leviers, comme des mesures environnementales ou de prévention, pourrait être instaurés au sein des exploitations.

3. La poursuite de l'entraînement du réseau de neurones

L'utilisation de l'application de reconnaissance d'insectes par un grand nombre d'utilisateurs permettrait de générer un nombre croissant et conséquent de photographies d'individus de différentes espèces d'insectes. Ces nouvelles photographies seraient utilisées pour constituer une banque de données continuellement alimentée afin de continuer à entraîner le réseau de neurones à la reconnaissance des individus de différentes espèces.

L'intervention de spécialistes avec la capacité de reconnaissance des différentes espèces resterait cependant indispensable au contrôle du bon fonctionnement du réseau de neurones. Une étude des photographies récoltées et du résultat donné par l'application serait nécessaire afin de contrôler la fiabilité des données obtenues et la conservation de la précision du modèle.

Le réseau de neurones sur lequel est basé l'application serait donc entraîné en continu et aurait la capacité de reconnaître de plus en plus d'individus appartenant à des espèces d'insectes variés avec une fiabilité croissante.

B. Biais de constitution de la banque de données photographiques

Bien qu'elle comprenne un nombre de clichés important et de qualités, la banque de données photographiques construite dans le cadre de ce travail de thèse présente différents biais intrinsèques à sa conception.

1. Matériel de photographie

Les photographies de la banque de données ont toutes été réalisées à l'aide de l'appareil photo de l'iPhone 11 et avec des paramètres identiques. Bien que le choix de ces paramètres ait été réalisé pour obtenir des clichés où les caractéristiques morphologiques des individus apparaissent clairement, il est également la source d'une diminution de la diversité des photographies composant la banque de données.

De plus, les photos réalisées par l'iPhone 11 présentent une bonne qualité. Il conviendrait de tester le modèle obtenu avec des photographies provenant de Smartphones différents et donc de qualités variables.

La présence de clichés de qualités différentes et pris avec des réglages différents serait un enrichissement pour la banque de données d'entraînement du modèle. Cette diversification permettrait une diminution du risque de surentraînement du réseau de neurones.

2. Diversité d'environnements utilisés pour la constitution de la banque de données

Comme expliqué précédemment, l'ensemble des clichés ont été pris dans un environnement semblable. L'arrière-plan des photographies alterne entre le fond en plastique blanc et la moustiquaire, en fonction des cages utilisées. Cette absence de diversité au sein des arrière-plans visibles sur les clichés peut être la source d'un surentraînement du réseau de neurones et être associé à une diminution de la fiabilité des propositions faites sur une photographie réalisée dans un environnement différent.

En effet, il s'agirait de tester la capacité du réseau entraîné avec des photographies possédant des fonds différents pour établir si cette caractéristique

altère la capacité de reconnaissance des individus par le modèle établi au cours de ce travail.

3. Utilisation d'insectes élevés en captivité

Les souches d'élevage d'espèces *Ae. albopictus* et *Ae. aegypti* utilisées au cours de ce travail présentent un inconvénient morphologique. En effet, certains individus élevés en captivité présentent une absence de motifs sur la tête et le thorax ou bien un motif plus fin et terne que des individus sauvages. Ce motif étant le principal critère morphologique de diagnose entre les deux espèces, il a été difficile de réaliser une majorité de photos où cette caractéristique était bien présente et identifiable. Cette modification de certains traits de morphologie externes a été décrite précédemment dans des souches maintenues en élevage.

Une étude réalisée en 2021 s'est intéressée à la capacité d'un réseau de neurones entraîné à distinguer ces deux espèces malgré la disparition de ce motif reconnaissable. Cette étude a montré qu'un réseau de neurones adapté et entraîné était capable de distinguer des individus appartenant à ces deux espèces avec une même précision de 98% en moyenne qu'un entomologiste aguerri (Ong et al. 2021).

Nous pouvons donc supposer que l'effacement de ce signe distinctif au cours de ce travail de thèse n'a pas entravé la reconnaissance des individus par le réseau de neurones au cours de son entraînement. De plus, les photos ayant été prises espèce par espèce, la reconnaissance par l'œil humain n'apporte pas de biais supplémentaires. La labellisation de la banque de données photos a été réalisée de manière fiable et précise. Un autre avantage de cette banque de données est qu'elle regroupe des clichés d'individus vivants ayant donc des postures naturelles, et retrouvées dans la nature. Ce critère est important afin d'entraîner le réseau de neurones avec des images pertinentes par rapport aux images qu'il devrait classifier dans le cadre d'une application de reconnaissance d'insectes.

Cependant, la réalisation de clichés d'une diversité plus importante d'individus serait une piste certaine d'amélioration de la banque de données photographiques réalisée et une source de diminution du risque de surentraînement du réseau de neurones.

En conclusion, la banque de données réalisée n'est pas aussi diversifiée qu'elle pourrait l'être mais comporte un nombre d'images supérieur à celui évoqué dans

l'ensemble des études similaires réalisées. Elle propose de plus l'avantage d'avoir été réalisée avec des individus vivants et à l'aide d'un Smartphone, ce qui correspond aux conditions de capture des images dans l'optique de la création d'une application de reconnaissance d'insectes.

C. Échec de l'étape de test du réseau de neurones

Comme évoqué à l'issue de la partie III, nous avons été confrontés à un problème d'extraction du résultat de l'entraînement du réseau de neurones. Cette erreur est survenue à l'étape de test du modèle établi avec une photographie inconnue. Il m'a été impossible de résoudre l'origine de cette erreur mais quelques suppositions sont exposées dans cette partie.

1. Incompatibilité de la taille des images de la banque de données

L'erreur produite par le script « `detection_test.py` » est la suivante : « `tensorflow.python.framework.errors_impl.InvalidArgumentError: Incompatible shapes : [X] vs. [Y]` », où X et Y sont des entiers positifs. Elle suggère une incompatibilité de forme entre deux éléments. L'argument entré dans une des fonctions du script ne correspondrait pas à la forme attendue.

a. Taille des images au sein de la banque de données

Dans un premier temps, l'hypothèse que les images de la banque de données étaient de taille trop importante a été émise. L'ensemble du processus a donc été testé avec une banque de données comportant quelques images de taille réduite. Au lieu de regrouper des images de 3 024 par 4 032 pixels, la nouvelle banque de données comportait des images de 600 par 800 pixels.

Cet essai a résulté en l'apparition du même message d'erreur à l'issue de l'exécution du script « `detection_test.py` » avec des entiers X et Y différents. La taille des images composant la banque de données initiale n'est donc pas à l'origine de cette erreur.

b. Erreur dans la conception des fichier CSV

La création des fichiers CSV aurait également pu être à l'origine d'une erreur entraînant une incompatibilité de taille entre deux éléments dans la suite du processus. Il aurait fallu vérifier que les valeurs de hauteur et largeur des images soient bien toutes positives et que les coordonnées xmin, xmax, ymin et ymax sont bien toutes incluses dans les images. Cette vérification aurait été laborieuse en prenant en considération le nombre important d'individus photographiés.

Cette hypothèse a également été évincée lors du test de l'ensemble du processus avec une banque de données de taille inférieur. En effet, les nouveaux fichiers CSV ainsi créés ont été vérifiés et ne comportait pas d'erreur susceptibles de nuire à la suite du processus.

2. Erreur au cours de l'entraînement du réseau de neurones

N'ayant pas trouvé d'erreur susceptible d'entraîner un dysfonctionnement du programme « `detection_test.py` » au sein de la conception de la banque de données, l'hypothèse qu'elle provienne de l'entraînement du réseau de neurones a été émise.

a. Choix des paramètres de l'entraînement

Les paramètres fixés pour l'entraînement du réseau de neurones ont été sélectionnés en fonction des caractéristiques de la banque de données et du résultat attendu. Bien qu'il ne semble pas que les choix effectués à cette étape puissent être à l'origine du type d'erreur obtenu, cette hypothèse n'est pas à écarter. Dans la démarche réalisée lors de ce travail de thèse, il a été décidé de terminer une première fois l'entraînement du réseau de neurones et en fonction de ce premier résultat d'affiner le choix des paramètres d'entraînement. Comme aucun résultat final n'a pu être obtenu, les paramètres d'entraînement n'ont pas été modifiés pour apprécier leur effet sur l'entraînement du réseau de neurones.

b. Erreur lors de l'exécution du programme « train.py »

Une autre hypothèse réside en l'existence d'une erreur au sein de l'étape d'entraînement du réseau de neurones. Cependant, cette piste n'a pas pu être explorée en raison de la complexité du script « train.py ».

Ce travail de thèse a permis l'élaboration d'une base de données photographiques conséquente et adaptée à son utilisation bien qu'elle soit perfectible par l'apport de clichés plus diversifiés. Cette base de données a été utilisée pour entraîner un réseau de neurones. Cependant, cette étape n'a pas pu aboutir en raison d'une erreur informatique non résolue. Ce travail s'inscrit dans le contexte de la création d'une application pour Smartphone de reconnaissance d'insecte dont les utilisations diverses et variées présenteraient des retombées multiples.

Conclusion

Ce projet a permis la conception d'une banque de données photographique regroupant 52 782 clichés, représentant 65 238 individus vivants mâles et femelles des espèces *Ae. aegypti*, *Ae. albopictus* et *Ph. perniciosus*. Ces espèces présentent un intérêt particulier en santé publique par leurs capacités à vectoriser de nombreux agents pathogènes à l'Homme et aux animaux. Cette banque de données a été mise en forme et les clichés labellisés afin de permettre son utilisation en tant que support pour l'entraînement du réseau de neurones convolutif Faster R-CNN. Cette banque de données est inédite dans la littérature en raison de sa taille et du fait qu'elle regroupe des clichés d'insectes vivants dans des positions physiologiques. Elle reste cependant perfectible par l'apport de photographies dans des environnements différents avec des fonds divers afin d'améliorer les capacités du réseau de neurones à localiser les individus sur l'image.

L'objectif de cette démarche était d'évaluer la possibilité de reconnaissance par un réseau de neurones, de l'espèce d'appartenance ainsi que du sexe d'un insecte présent sur une photographie. L'entraînement du réseau de neurones convolutif Faster R-CNN a donc été réalisé sur la plateforme Colaboratory dans le cadre de ce projet. Une fois l'entraînement avancé, le réseau de neurones a été testé avec une photographie d'insecte inconnue. Cependant, ce processus n'a pas permis d'aboutir au résultat escompté en raison d'une erreur informatique dont l'origine n'a pas pu être clairement déterminée.

Cette étude constitue donc le point de départ d'un projet plus vaste de développement d'une application pour Smartphone, faisant appel au concept d'intelligence artificielle, capable de reconnaître instantanément l'espèce d'un insecte présent sur une photographie. Ce dernier demandera la création de banques de données complémentaires contenant des images d'insectes d'autres espèces, une optimisation des paramètres d'entraînement du réseau de neurones ainsi que la compréhension et la résolution de l'erreur à laquelle nous avons été confronté au cours de ce travail. Cette application permettra l'étude en temps réel des populations d'insectes et plus particulièrement de leur répartition géographique précise. Une meilleure connaissance des espèces vectrices ou nuisibles permettra la mise en place de moyens de lutte plus adaptés. De plus, le réseau de neurones support recevra des

photographies en continu pour son entraînement, ce qui permettra de parfaire ses compétences de classification d'images d'insectes.

Références bibliographiques

ALBAWI, Saad, ABED MOHAMMED, Tareq et ALZAWI, Saad, 2017. *Understanding of a Convolutional Neural Network*.

ALEMAYEHU, Bereket et ALEMAYEHU, Mihiretu, 2017. Leishmaniasis: A Review on Parasite, Vector and Reservoir Host. *Health Science Journal* [en ligne]. 2017. Vol. 11, n° 4. [Consulté le 4 novembre 2022]. DOI 10.21767/1791-809X.1000519. Disponible à l'adresse : <http://www.hsj.gr/medicine/leishmaniasis-a-review-on-parasite-vector-and-reservoir-host.php?aid=20131>

ALEXANDER, B., 2000. Sampling methods for phlebotomine sandflies. *Medical and Veterinary Entomology*. juin 2000. Vol. 14, n° 2, pp. 109-122. DOI 10.1046/j.1365-2915.2000.00237.x.

ALKAN, Cigdem, BICHAUD, Laurence, DE LAMBALLERIE, Xavier, ALTEN, Bulent, GOULD, Ernest A. et CHARREL, Rémi N., 2013. Sandfly-borne phleboviruses of Eurasia and Africa: Epidemiology, genetic diversity, geographic range, control measures. *Antiviral Research*. octobre 2013. Vol. 100, n° 1, pp. 54-74. DOI 10.1016/j.antiviral.2013.07.005.

ALOM, Md Zahangir, TAHA, Tarek M., YAKOPCIC, Chris, WESTBERG, Stefan, SIDIKE, Paheding, NASRIN, Mst Shamima, HASAN, Mahmudul, VAN ESSEN, Brian C., AWWAL, Abdul A. S. et ASARI, Vijayan K., 2019. A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. *Electronics*. 5 mars 2019. Vol. 8, n° 3, pp. 292. DOI 10.3390/electronics8030292.

ALTEN, B., OZBEL, Y., ERGUNAY, K., KASAP, O.E., CULL, B., ANTONIOU, M., VELO, E., PRUDHOMME, J., MOLINA, R., BAÑULS, A.-L., SCHAFFNER, F., HENDRICKX, G., VAN BORTEL, W. et MEDLOCK, J.M., 2015. Sampling strategies for phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) in Europe. *Bulletin of Entomological Research*. décembre 2015. Vol. 105, n° 6, pp. 664-678. DOI 10.1017/S0007485315000127.

ALTEN, Bulent, MAIA, Carla, AFONSO, Maria Odete, CAMPINO, Lenea, JIMÉNEZ, Maribel, GONZÁLEZ, Estela, MOLINA, Ricardo, BAÑULS, Anne Laure, PRUDHOMME, Jorian, VERGNES, Baptiste, TOTY, Celine, CASSAN, Cécile, RAHOLA, Nil, THIERRY, Magali, SERENO, Denis, BONGIORNO, Gioia, BIANCHI, Riccardo, KHOURY, Cristina, TSIRIGOTAKIS, Nikolaos, DOKIANAKIS, Emmanouil, ANTONIOU, Maria, CHRISTODOULOU, Vasiliki, MAZERIS, Apostolos, KARAKUS, Mehmet, OZBEL, Yusuf, ARSERIM, Suha K., ERISOZ KASAP, Ozge, GUNAY, Filiz, OGUZ, Gizem, KAYNAS, Sinan, TSERTSVADZE, Nikoloz, TSKHVARADZE, Lamzira, GIORGOBIANI, Ekaterina, GRAMICCIA, Marina, VOLF, Petr et GRADONI, Luigi, 2016. Seasonal Dynamics of Phlebotomine Sand Fly Species Proven Vectors of Mediterranean Leishmaniasis Caused by *Leishmania infantum*. BATES, Paul Andrew (éd.), *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 22 février 2016. Vol. 10, n° 2, pp. e0004458. DOI 10.1371/journal.pntd.0004458.

ALTO, Barry W. et JULIANO, Steven A., 2001. Temperature Effects on the Dynamics of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) Populations in the Laboratory. *Journal of Medical Entomology*. 1 juillet 2001. Vol. 38, n° 4, pp. 548-556. DOI 10.1603/0022-2585-38.4.548.

ANDREW, J et BAR, Ananya, 2013. Morphology and Morphometry of *Aedes aegypti* Adult Mosquito. . 2013. pp. 18.

ARMBRUSTER, Peter A., 2016. Photoperiodic Diapause and the Establishment of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in North America. *Journal of Medical Entomology*. septembre 2016. Vol. 53, n° 5, pp. 1013-1023. DOI 10.1093/jme/tjw037.

BARGIELOWSKI, I. E., LOUNIBOS, L. P. et CARRASQUILLA, M. C., 2013. Evolution of resistance to satyrization through reproductive character displacement in populations of invasive dengue vectors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 19 février 2013. Vol. 110, n° 8, pp. 2888-2892. DOI 10.1073/pnas.1219599110.

BELKIN, John N., 1962. The Mosquitoes of the South Pacific (Diptera, Culicidae). *The Mosquitoes of the South Pacific (Diptera, Culicidae)*, Vol. 2. 1962. Vol. 2.

BENALLAL, Kamal Eddine, GARNI, Rafik, HARRAT, Zoubir, VOLF, Petr et DVORAK, Vít, 2022. Phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) of the Maghreb region: A systematic review of distribution, morphology, and role in the transmission of the pathogens. FUEHRER, Hans-Peter (éd.), *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 6 janvier 2022. Vol. 16, n° 1, pp. e0009952. DOI 10.1371/journal.pntd.0009952.

BERDJANE-BROUK, Zohra, KONÉ, Abdoulaye K., DJIMDÉ, Abdoulaye A., CHARREL, Rémi N., RAVEL, Christophe, DELAUNAY, Pascal, DEL GIUDICE, Pascal, DIARRA, Adama Z., DOUMBO, Siala, GOITA, Siaka, THERA, Mahamadou A., DEPAQUIT, Jérôme, MARTY, Pierre, DOUMBO, Ogobara K. et IZRI, Arezki, 2012. First Detection of *Leishmania major* DNA in *Sergentomyia* (*Spelaeomyia*) *darlingi* from Cutaneous Leishmaniasis Foci in Mali. ZILBERSTEIN, Dan (éd.), *PLoS ONE*. 20 janvier 2012. Vol. 7, n° 1, pp. e28266. DOI 10.1371/journal.pone.0028266.

BICHAUD, Laurence, SOURIS, Marc, MARY, Charles, NINOVE, Laëtitia, THIRION, Laurence, PIARROUX, Raphaël P., PIARROUX, Renaud, DE LAMBALLERIE, Xavier et CHARREL, Rémi N., 2011. Epidemiologic Relationship between Toscana Virus Infection and *Leishmania infantum* Due to Common Exposure to *Phlebotomus perniciosus* Sandfly Vector. VALENZUELA, Jesus G. (éd.), *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 20 septembre 2011. Vol. 5, n° 9, pp. e1328. DOI 10.1371/journal.pntd.0001328.

BONGIORNO, Gioia, HABLUETZEL, Annette, KHOURY, C et MAROLI, M, 2003. Host reference of phlebotomine sand flies at a hypodermic focus of canine leishmaniosis in central Italy. *Acta tropica*. 1 novembre 2003. Vol. 88, pp. 109-16. DOI 10.1016/S0001-706X(03)00190-6.

BONIZZONI, Mariangela, GASPERI, Giuliano, CHEN, Xioaguang et JAMES, Anthony A., 2013. The invasive mosquito species *Aedes albopictus*: current knowledge and future perspectives. *Trends in Parasitology*. septembre 2013. Vol. 29, n° 9, pp. 460-468. DOI 10.1016/j.pt.2013.07.003.

BOUSSAA, S., BOUMEZZOUGH, A., REMY, P.E., GLASSER, N. et PESSON, B., 2008. Morphological and isoenzymatic differentiation of *Phlebotomus perniciosus* and *Phlebotomus longicuspis* (Diptera: Psychodidae) in Southern Morocco. *Acta Tropica*. juin 2008. Vol. 106, n° 3, pp. 184-189. DOI 10.1016/j.actatropica.2008.03.011.

BROWN, Julia E., EVANS, Benjamin R., ZHENG, Wei, OBAS, Vanessa, BARRERA-MARTINEZ, Laura, EGIZI, Andrea, ZHAO, Hongyu, CACCONE, Adalgisa et POWELL,

Jeffrey R., 2014. Human impacts have shaped historical and recent evolution in *Aedes aegypti*, the dengue and yellow fever mosquito: evolutionary genetic history of *Aedes aegypti*. *Evolution*. février 2014. Vol. 68, n° 2, pp. 514-525. DOI 10.1111/evo.12281.

BROWN, Julia E., MCBRIDE, Carolyn S., JOHNSON, Petrina, RITCHIE, Scott, PAUPY, Christophe, BOSSIN, Hervé, LUTOMIAH, Joel, FERNANDEZ-SALAS, Ildefonso, PONLAWAT, Alongkot, CORNEL, Anthony J., BLACK, William C., GORROCHOTEGUI-ESCALANTE, Norma, URDANETA-MARQUEZ, Ludmel, SYLLA, Massamba, SLOTMAN, Michel, MURRAY, Kristy O., WALKER, Christopher et POWELL, Jeffrey R., 2011. Worldwide patterns of genetic differentiation imply multiple 'domestications' of *Aedes aegypti*, a major vector of human diseases. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 22 août 2011. Vol. 278, n° 1717, pp. 2446-2454. DOI 10.1098/rspb.2010.2469.

BRYANT, Juliet E, HOLMES, Edward C et BARRETT, Alan D. T, 2007. Out of Africa: A Molecular Perspective on the Introduction of Yellow Fever Virus into the Americas. SUBBARAO, Kanta (éd.), *PLoS Pathogens*. 18 mai 2007. Vol. 3, n° 5, pp. e75. DOI 10.1371/journal.ppat.0030075.

CAPUTO, Beniamino, IENCO, Annamaria, CIANCI, Daniela, POMBI, Marco, PETRARCA, Vincenzo, BASEGGIO, Alberto, DEVINE, Gregor et DELLA TORRE, Alessandra, 2012. The "Auto-Dissemination" Approach: A Novel Concept to Fight *Aedes albopictus* in Urban Areas. *PLoS neglected tropical diseases*. 1 août 2012. Vol. 6, pp. e1793. DOI 10.1371/journal.pntd.0001793.

CHAIPHONGPACHARA, Tanawat et LAOJUN, Sedthapong, 2019. Short Communication: Landmark-based geometric morphometric analysis of wings to distinguish the sex of *Aedes* mosquito vectors in Thailand. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 21 janvier 2019. Vol. 20, n° 2, pp. 419-424. DOI 10.13057/biodiv/d200216.

CHARREL, Remi N, 2012. Emergence of Toscana virus in the mediterranean area. *World Journal of Virology*. 2012. Vol. 1, n° 5, pp. 135. DOI 10.5501/wjv.v1.i5.135.

COURET, Jannelle et BENEDICT, Mark Q, 2014. A meta-analysis of the factors influencing development rate variation in *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *BMC Ecology*. 2014. Vol. 14, n° 1, pp. 3. DOI 10.1186/1472-6785-14-3.

COURET, Jannelle, DOTSON, Ellen et BENEDICT, Mark Q., 2014. Temperature, Larval Diet, and Density Effects on Development Rate and Survival of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). OLIVEIRA, Pedro Lagerblad (éd.), *PLoS ONE*. 3 février 2014. Vol. 9, n° 2, pp. e87468. DOI 10.1371/journal.pone.0087468.

DANTAS-TORRES, Filipe, TARALLO, Viviana Domenica et OTRANTO, Domenico, 2014. Morphological keys for the identification of Italian phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). *Parasites & Vectors*. décembre 2014. Vol. 7, n° 1, pp. 479. DOI 10.1186/s13071-014-0479-5.

DARSIE, E et ANNA, Jr Inno, 1997. Keys for the identification os the mosquitoes of Greece. . 1997. pp. 8.

DEDET, Jean-Pierre, ADDADI, Kamel et BELLAZOUG, Smail, 1984. Les Phlébotomes (Diptera: Psychodidae) d'Algérie. *Entomologie Médicale et Parasitologie*. 1984. Vol. 22, n° 2, pp. 99-127.

DELATTE, Helene, DESVARS, Amelie, BOUÉTARD, Anthony, BORD, Séverine, GIMONNEAU, Geoffrey, VOUREC'H, Gwenaël et FONTENILLE, Didier, 2010. Blood-Feeding Behavior of *Aedes albopictus*, a Vector of Chikungunya on La Réunion. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*. avril 2010. Vol. 10, n° 3, pp. 249-258. DOI 10.1089/vbz.2009.0026.

DEPAQUIT, J, GRANDADAM, M, FOUQUE, F, ANDRY, Pe et PEYREFITTE, C, 2010. Arthropod-borne viruses transmitted by Phlebotomine sandflies in Europe: a review. *Eurosurveillance* [en ligne]. 11 mars 2010. Vol. 15, n° 10. [Consulté le 8 février 2022]. DOI 10.2807/ese.15.10.19507-en. Disponible à l'adresse : <https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/ese.15.10.19507-en>

DEPAQUIT, Jérôme et LÉGER, Nicole, 2017. Les phlébotomes (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). In : *Entomologie médicale et vétérinaire*. Editions Quae. pp. 295-320. ISBN 978-2-7592-2676-4.

DESJEUX, P., 2001. The increase in risk factors for leishmaniasis worldwide. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. mai 2001. Vol. 95, n° 3, pp. 239-243. DOI 10.1016/S0035-9203(01)90223-8.

DI MUCCIO, Trentina, MARINUCCI, Marino, FRUSTERI, Liliana, MAROLI, Michele, PESSON, Bernard et GRAMICCIA, Marina, 2000. Phylogenetic analysis of *Phlebotomus* species belonging to the subgenus *Larrousius* (Diptera, Psychodidae) by ITS2 rDNA sequences. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*. mai 2000. Vol. 30, n° 5, pp. 387-393. DOI 10.1016/S0965-1748(00)00012-6.

DINIZ, Diego Felipe Araujo, ROMÃO, Tatiany Patrícia, HELVÉCIO, Elisama, DE CARVALHO-LEANDRO, Danilo, XAVIER, Morgana do Nascimento, PEIXOTO, Christina Alves, DE MELO NETO, Osvaldo Pompílio, MELO-SANTOS, Maria Alice Varjal de et AYRES, Constância Flávia Junqueira, 2022. A comparative analysis of *Aedes albopictus* and *Aedes aegypti* subjected to diapause-inducing conditions reveals conserved and divergent aspects associated with diapause, as well as novel genes associated with its onset. *Current Research in Insect Science*. 2022. Vol. 2, pp. 100047. DOI 10.1016/j.cris.2022.100047.

DOLMATOVA, A V, DEMINA, N A, KOBYLANSKY, A., ABONNENC, E. et RAGEAU, J., 1971. Les phlébotomes (Phlebotominae) et les maladies qu'ils transmettent. . 1971. pp. 169.

DREYFUS, Gérard, MARTINEZ, Jean-Marc, SAMUELIDES, Manuel, GORDON, Mirta B., BADRAN, Fouad et THIRIA, Sylvie, 2011. *Apprentissage statistique: Réseaux de neurones - Cartes topologiques - Machines à vecteurs supports*. Editions Eyrolles. ISBN 978-2-212-04298-6.

EGID, Beatrice R., COULIBALY, Mamadou, DADZIE, Samuel Kweku, KAMGANG, Basile, MCCALL, Philip J., SEDDA, Luigi, TOE, Kobié Hyacinthe et WILSON, Anne L., 2022. Review of the ecology and behaviour of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in Western Africa and implications for vector control. *Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases*. 2022. Vol. 2, pp. 100074. DOI 10.1016/j.crpvbd.2021.100074.

FALL, A.G., 2013. *Techniques de capture et d'identification des moustiques (Diptera: Culicidae) vecteurs de la fièvre de la vallée du Rift*. 2013.

FISCHER, Dominik, MOELLER, Philipp, THOMAS, Stephanie M., NAUCKE, Torsten J.

et BEIERKUHNEIN, Carl, 2011. Combining Climatic Projections and Dispersal Ability: A Method for Estimating the Responses of Sandfly Vector Species to Climate Change. GÜRTLER, Ricardo E. (éd.), *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 29 novembre 2011. Vol. 5, n° 11, pp. e1407. DOI 10.1371/journal.pntd.0001407.

FOOTE, Richard H., 1961. *Aedes Aegypti* (L.), the Yellow Fever Mosquito. Its life history, bionomics, and structure. *Science*. 12 mai 1961. Vol. 133, n° 3463, pp. 1473-1474. DOI 10.1126/science.133.3463.1473.b.

FOSTER, Woodbridge A. et WALKER, Edward D., 2019. Mosquitoes (Culicidae). In : *Medical and Veterinary Entomology* [en ligne]. Elsevier. pp. 261-325. [Consulté le 24 octobre 2022]. ISBN 978-0-12-814043-7. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128140437000157>

GALATI, Eunice A. B., GALVIS-OVALLOS, Fredy, LAWYER, Phillip, LÉGER, Nicole et DEPAQUIT, Jérôme, 2017. An illustrated guide for characters and terminology used in descriptions of Phlebotominae (Diptera, Psychodidae). *Parasite*. 2017. Vol. 24, pp. 26. DOI 10.1051/parasite/2017027.

GANASCIA, Jean-Gabriel, 2017. *Intelligence artificielle - vers une domination programmée*. Le Cavalier Bleu. ISBN 979-10-318-0244-2.

HAIECH, Jacques, 2020. Parcourir l'histoire de l'intelligence artificielle, pour mieux la définir et la comprendre. *médecine/sciences*. octobre 2020. Vol. 36, n° 10, pp. 919-923. DOI 10.1051/medsci/2020145.

HAMET, Pavel et TREMBLAY, Johanne, 2017. Artificial intelligence in medicine. *Metabolism*. avril 2017. Vol. 69, pp. S36-S40. DOI 10.1016/j.metabol.2017.01.011.

HANSON, Scott M. et CRAIG, George B., 1994. Cold Acclimation, Diapause, and Geographic Origin Affect Cold Hardiness in Eggs of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*. 1 mars 1994. Vol. 31, n° 2, pp. 192-201. DOI 10.1093/jmedent/31.2.192.

HARBACH, RALPH E., 2007. The Culicidae (Diptera): a review of taxonomy, classification and phylogeny *. [en ligne]. 31 décembre 2007. [Consulté le 24 octobre 2022]. DOI 10.5281/ZENODO.180118. Disponible à l'adresse : <https://zenodo.org/record/180118>

HARBACH, Ralph E. et KITCHING, Ian J., 1998. Phylogeny and classification of the Culicidae (Diptera). *Systematic Entomology*. octobre 1998. Vol. 23, n° 4, pp. 327-370. DOI 10.1046/j.1365-3113.1998.00072.x.

HARDY, Corentin, 2019. *Contribution au développement de l'apprentissage profond dans les systèmes distribués*.

HARRINGTON, Laura C. et PONLAWAT, Alongkot, 2009. Factors Associated with Male Mating Success of the Dengue Vector Mosquito, *Aedes aegypti*. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 1 mars 2009. Vol. 80, n° 3, pp. 395-400. DOI 10.4269/ajtmh.2009.80.395.

HASSELQUIST, Fredrik, 1757. *Iter Palaestinum eller Resa til Heliga Landet forrattad ifran ar 1749 til 1752*. Salvii.

HELINSKI, Michelle E. H., SCOTT, Thomas W., FACCHINELLI, Luca, VALERIO, Laura, HARRINGTON, Laura C. et RAMSEY, Janine, 2012. Evidence of Polyandry for *Aedes*

aegypti in Semifield Enclosures. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 1 avril 2012. Vol. 86, n° 4, pp. 635-641. DOI 10.4269/ajtmh.2012.11-0225.

HIGA, Yukiko, 2011. Dengue Vectors and their Spatial Distribution. *Tropical medicine and health*. 1 décembre 2011. Vol. 39, pp. 17-27. DOI 10.2149/tmh.2011-S04.

HOUÉ, Vincent, BONIZZONI, Mariangela et FAILLOUX, Anna-Bella, 2019. Endogenous non-retroviral elements in genomes of *Aedes* mosquitoes and vector competence. *Emerging Microbes & Infections*. 1 janvier 2019. Vol. 8, n° 1, pp. 542-555. DOI 10.1080/22221751.2019.1599302.

JANCAROVA, Magdalena, BICHAUD, Laurence, HLAVACOVA, Jana, PRIET, Stephane, AYHAN, Nazli, SPITZOVA, Tatiana, VOLF, Petr et CHARREL, Remi, 2019. Experimental Infection of Sand Flies by Massilia Virus and Viral Transmission by Co-Feeding on Sugar Meal. *Viruses*. 9 avril 2019. Vol. 11, n° 4, pp. 332. DOI 10.3390/v11040332.

JEANNIN, Charles, PERRIN, Yvon, CORNELIE, Sylvie, GLORIA-SORIA, Andrea, GAUCHET, Jean-Daniel et ROBERT, Vincent, 2022. An alien in Marseille: investigations on a single *Aedes aegypti* mosquito likely introduced by a merchant ship from tropical Africa to Europe. *Parasite*. 2022. Vol. 29, pp. 42. DOI 10.1051/parasite/2022043.

JULIANO, Steven, 2009. Species Interactions Among Larval Mosquitoes: Context Dependence Across Habitat Gradients. *Annual review of entomology*. 1 février 2009. Vol. 54, pp. 37-56. DOI 10.1146/annurev.ento.54.110807.090611.

JULIANO, Steven A. et PHILIP LOUNIBOS, L., 2005. Ecology of invasive mosquitoes: effects on resident species and on human health: Invasive mosquitoes. *Ecology Letters*. mai 2005. Vol. 8, n° 5, pp. 558-574. DOI 10.1111/j.1461-0248.2005.00755.x.

KAMGANG, Basile, NCHOUTPOUEN, Elysée, SIMARD, Frédéric et PAUPY, Christophe, 2012. Notes on the blood-feeding behavior of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Cameroon. *Parasites & Vectors*. décembre 2012. Vol. 5, n° 1, pp. 57. DOI 10.1186/1756-3305-5-57.

KAMHAWI, Shaden, 2000. The biological and immunomodulatory properties of sand fly saliva and its role in the establishment of *Leishmania* infections. *Microbes and Infection*. novembre 2000. Vol. 2, n° 14, pp. 1765-1773. DOI 10.1016/S1286-4579(00)01331-9.

KAMHAWI, Shaden, 2006. Phlebotomine sand flies and *Leishmania* parasites: friends or foes? *Trends in Parasitology*. septembre 2006. Vol. 22, n° 9, pp. 439-445. DOI 10.1016/j.pt.2006.06.012.

KILLICK-KENDRICK, R., 1990. Phlebotomine vectors of the leishmaniasis: a review. *Medical and Veterinary Entomology*. janvier 1990. Vol. 4, n° 1, pp. 1-24. DOI 10.1111/j.1365-2915.1990.tb00255.x.

KILLICK-KENDRICK, R., 1999. The biology and control of Phlebotomine sand flies. *Clinics in Dermatology*. 6 mai 1999. Vol. 17, n° 3, pp. 279-289. DOI 10.1016/S0738-081X(99)00046-2.

KOCH, Lisa K., KOCHMANN, Judith, KLIMPEL, Sven et CUNZE, Sarah, 2017. Modeling the climatic suitability of leishmaniasis vector species in Europe. *Scientific Reports*. décembre 2017. Vol. 7, n° 1, pp. 13325. DOI 10.1038/s41598-017-13822-1.

KRAEMER, Moritz U. G., REINER, Robert C., BRADY, Oliver J., MESSINA, Jane P., GILBERT, Marius, PIGOTT, David M., YI, Dingdong, JOHNSON, Kimberly, EARL, Lucas, MARCZAK, Laurie B., SHIRUDE, Shreya, DAVIS WEAVER, Nicole, BISANZIO, Donal, PERKINS, T. Alex, LAI, Shengjie, LU, Xin, JONES, Peter, COELHO, Giovanini E., CARVALHO, Roberta G., VAN BORTEL, Wim, MARSBOOM, Cedric, HENDRICKX, Guy, SCHAFFNER, Francis, MOORE, Chester G., NAX, Heinrich H., BENGTSSON, Linus, WETTER, Erik, TATEM, Andrew J., BROWNSTEIN, John S., SMITH, David L., LAMBRECHTS, Louis, CAUCHEMEZ, Simon, LINARD, Catherine, FARIA, Nuno R., PYBUS, Oliver G., SCOTT, Thomas W., LIU, Qiyong, YU, Hongjie, WINT, G. R. William, HAY, Simon I. et GOLDING, Nick, 2019. Past and future spread of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Nature Microbiology*. mai 2019. Vol. 4, n° 5, pp. 854-863. DOI 10.1038/s41564-019-0376-y.

KRAEMER, Moritz UG, SINKA, Marianne E, DUDA, Kirsten A, MYLNE, Adrian QN, SHEARER, Freya M, BARKER, Christopher M, MOORE, Chester G, CARVALHO, Roberta G, COELHO, Giovanini E, VAN BORTEL, Wim, HENDRICKX, Guy, SCHAFFNER, Francis, ELYAZAR, Iqbal RF, TENG, Hwa-Jen, BRADY, Oliver J, MESSINA, Jane P, PIGOTT, David M, SCOTT, Thomas W, SMITH, David L, WINT, GR William, GOLDING, Nick et HAY, Simon I, 2015. The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *eLife*. 30 juin 2015. Vol. 4, pp. e08347. DOI 10.7554/eLife.08347.

KRIZHEVSKY, Alex, SUTSKEVER, Ilya et HINTON, Geoffrey E., 2017. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 24 mai 2017. Vol. 60, n° 6, pp. 84-90. DOI 10.1145/3065386.

LAMBRECHTS, Louis, SCOTT, Thomas W. et GUBLER, Duane J., 2010. Consequences of the Expanding Global Distribution of *Aedes albopictus* for Dengue Virus Transmission. HALSTEAD, Scott B. (éd.), *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 25 mai 2010. Vol. 4, n° 5, pp. e646. DOI 10.1371/journal.pntd.0000646.

LANE, R. P., 1993. Sandflies (Phlebotominae). In : LANE, Richard P. et CROSSKEY, Roger W. (éd.), *Medical Insects and Arachnids* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. pp. 78-119. [Consulté le 8 février 2022]. ISBN 978-94-010-4679-4. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-1554-4_4

LE GOFF, Gilbert, BRENGUES, Cécile et ROBERT, Vincent, 2013. *Stegomyia* mosquitoes in Mayotte, taxonomic study and description of *Stegomyia pia* n. sp. *Parasite*. 2013. Vol. 20, pp. 31. DOI 10.1051/parasite/2013030.

LE RUTTE, Epke A., VAN DER WILT, Lotte S., BULSTRA, Caroline A., NIEBOER, Daan, KONTOROUPI, Periklis, DE VLAS, Sake J. et RICHARDUS, Jan Hendrik, 2021. Incidence and geographical distribution of canine leishmaniosis in 2016–2017 in Spain and France. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*. juillet 2021. Vol. 25, pp. 100613. DOI 10.1016/j.vprsr.2021.100613.

LECUN, Y et RANZATO, MA, 2015. Deep Learning. . 2015. Vol. 521, n° 7553, pp. 58.

LECUN, Yann, BOTTOU, Leon, BENGIO, Yoshua et HA, Patrick, 1998. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. . 1998. pp. 46.

LÉGER, N., PESSON, B., MADULO-LEBLOND, G. et ABONNENC, E., 1983. Sur la différenciation des femelles du sous-genre *Larrousius nitzulescu*, 1931: (Diptera-Phlebotomidae) de la région méditerranéenne. *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée*. 1983. Vol. 58, n° 6, pp. 611-623. DOI 10.1051/parasite/1983586611.

LEWIS, D. J., YOUNG, D.G., FAIRCHILD, G. B. et MINTER, D. M., 1977. Proposals for a stable classification of the Phlebotomine sandflies (Diptera: Psychodidae). *Systematic Entomology*. octobre 1977. Vol. 2, n° 4, pp. 319-332. DOI 10.1111/j.1365-3113.1977.tb00381.x.

LOUNIBOS, L. P., ESCHER, R. L. et LOURENÇO-DE-OLIVEIRA, R., 2003. Asymmetric Evolution of Photoperiodic Diapause in Temperate and Tropical Invasive Populations of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Annals of the Entomological Society of America*. 1 juillet 2003. Vol. 96, n° 4, pp. 512-518. DOI 10.1603/0013-8746(2003)096[0512:AEOPDI]2.0.CO;2.

MAROLI, Michele, GRADONI, Luigi, OLIVA, Gaetano, CASTAGNARO, Massimo, CROTTI, Alberto, LUBAS, George, PALTRINIERI, Saverio, ROURA, Xavier, ZINI, Eric et ZATELLI, Andrea, 2010. Guidelines for prevention of leishmaniasis in dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. juin 2010. Vol. 236, n° 11, pp. 1200-1206. DOI 10.2460/javma.236.11.1200.

MATHIS, Alexander, DEPAQUIT, Jérôme, DVORÁK, Vit, TUTEN, Holly, BAÑULS, Anne-Laure, HALADA, Petr, ZAPATA, Sonia, LEHRTER, Véronique, HLAVAČKOVÁ, Kristýna, PRUDHOMME, Jorian, VOLF, Petr, SERENO, Denis, KAUFMANN, Christian, PFLÜGER, Valentin et SCHAFFNER, Francis, 2015. Identification of phlebotomine sand flies using one MALDI-TOF MS reference database and two mass spectrometer systems. *Parasites & Vectors*. décembre 2015. Vol. 8, n° 1, pp. 266. DOI 10.1186/s13071-015-0878-2.

MEDLOCK, Jolyon M., HANSFORD, Kayleigh M., SCHAFFNER, Francis, VERSTEIRT, Veerle, HENDRICKX, Guy, ZELLER, Herve et BORTEL, Wim Van, 2012. A Review of the Invasive Mosquitoes in Europe: Ecology, Public Health Risks, and Control Options. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*. juin 2012. Vol. 12, n° 6, pp. 435-447. DOI 10.1089/vbz.2011.0814.

MEDLOCK, Jolyon M., HANSFORD, Kayleigh M., VAN BORTEL, Wim, ZELLER, Herve et ALTEN, Bulent, 2014. A summary of the evidence for the change in European distribution of phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) of public health importance. *Journal of Vector Ecology*. 2014. Vol. 39, n° 1, pp. 72-77. DOI 10.1111/j.1948-7134.2014.12072.x.

MEIGEN, Johann Wilhelm, 1869. *Systematische Beschreibung der bekannten europäischen zweiflügeligen Insecten*. HW Schmidt.

MINTZ, Yoav et BRODIE, Ronit, 2019. Introduction to artificial intelligence in medicine. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. 4 mars 2019. Vol. 28, n° 2, pp. 73-81. DOI 10.1080/13645706.2019.1575882.

MITCHELL, Tom M., 1997. *Machine Learning*. New York : McGraw-Hill. McGraw-Hill series in computer science. ISBN 978-0-07-042807-2. Q325.5 .M58 1997

MSD SANTÉ ANIMALE FRANCE, 2021. Tickit : une nouvelle application mobile pour signaler les tiques des chiens et des chats. *MSD Santé Animale France* [en ligne]. 2021. [Consulté le 21 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.msd-sante-animale.fr/infos-institutionnelles/tickit-nouvelle-appli-mobile-tiques-chiens-chats/>

MÜLLER, Günter C., KRAVCHENKO, Vasilij D. et SCHLEIN, Yosef, 2011. Seasonal and spatial changes of sand fly species in a canyon in the Carmel Mountains. *Journal of Vector Ecology*. mars 2011. Vol. 36, pp. S118-S127. DOI 10.1111/j.1948-

7134.2011.00120.x.

MUNDIM-POMBO, Ana Paula Miranda, CARVALHO, Hianka Jasmyne Costa de, RODRIGUES RIBEIRO, Rafaela, LEÓN, Marisol, MARIA, Durvanei Augusto et MIGLINO, Maria Angélica, 2021. *Aedes aegypti*: egg morphology and embryonic development. *Parasites & Vectors*. décembre 2021. Vol. 14, n° 1, pp. 531. DOI 10.1186/s13071-021-05024-6.

NAUCKE, Torsten, MENN, B, MASSBERG, Desiree et LORENTZ, Susanne, 2008. Sandflies and leishmaniasis in Germany. *Parasitology research*. 1 décembre 2008. Vol. 103 Suppl 1, pp. S65-8. DOI 10.1007/s00436-008-1052-y.

NEVEU-LEMAIRE, M., 1923. L'évolution de la classification des Culicidæ. *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée*. 1923. Vol. 1, n° 1, pp. 90-107. DOI 10.1051/parasite/1923011090.

NEWMAN, E., 1834. Attempted division of British insects into natural orders. *The Entomological magazine*. 1834. Vol. 2, pp. 379-431.

OKAYASU, Kazushige, YOSHIDA, Kota, FUCHIDA, Masataka et NAKAMURA, Akio, 2019. Vision-Based Classification of Mosquito Species: Comparison of Conventional and Deep Learning Methods. *Applied Sciences*. 19 septembre 2019. Vol. 9, n° 18, pp. 3935. DOI 10.3390/app9183935.

ONG, Song-Quan, AHMAD, Hamdan, NAIR, Gomesh, ISAWASAN, Pradeep et MAJID, Abdul Hafiz Ab, 2021. Implementation of a deep learning model for automated classification of *Aedes aegypti* (Linnaeus) and *Aedes albopictus* (Skuse) in real time. *Scientific Reports*. décembre 2021. Vol. 11, n° 1, pp. 9908. DOI 10.1038/s41598-021-89365-3.

PAPE, Thomas, BLAGODEROV, Vladimir et MOSTOVSKI, Mikhail B., 2011. Order Diptera Linnaeus, 1758. In: *Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness*. pp. 222-229.

PARK, Junyoung, KIM, Dong In, CHOI, Byoungjo, KANG, Woochul et KWON, Hyung Wook, 2020. Classification and Morphological Analysis of Vector Mosquitoes using Deep Convolutional Neural Networks. *Scientific Reports*. décembre 2020. Vol. 10, n° 1, pp. 1012. DOI 10.1038/s41598-020-57875-1.

PASQUIER, G., ZRIBI, A., LAMI, P., DEMAR, M., MARTY, P., BUFFET, P., BASTIEN, P., RAVEL, C. et LACHAUD, L., 2021. Épidémiologie des leishmanioses sur le territoire français de 1998 à 2020. *Infectious Diseases Now*. août 2021. Vol. 51, n° 5, pp. S12. DOI 10.1016/j.idnow.2021.06.036.

PATSOULA, Eleni, SAMANIDOU-VOYADJOGLOU, Anna, SPANAKOS, Gregory, KREMASTINO, Jenny, NASIOULAS, Georgios et VAKALIS, Nikolaos C., 2006. Molecular and Morphological Characterization of *Aedes albopictus* in Northwestern Greece and Differentiation from *Aedes cretinus* and *Aedes aegypti*. *Journal of Medical Entomology*. 1 janvier 2006. Vol. 43, n° 1, pp. 40-54. DOI 10.1093/jmedent/43.1.40.

PAUPY, Christophe, DELATTE, Helene, BAGNY BEILHE, Leïla, CORBEL, Vincent et FONTENILLE, Didier, 2009. *Aedes albopictus*, an arbovirus vector: From the darkness to the light. *Microbes and infection / Institut Pasteur*. 1 juin 2009. Vol. 11, pp. 1177-85. DOI 10.1016/j.micinf.2009.05.005.

PEREZ, Mario H. et NORIEGA, Fernando G., 2012. *Aedes aegypti* pharate 1st instar

quiescence affects larval fitness and metal tolerance. *Journal of Insect Physiology*. juin 2012. Vol. 58, n° 6, pp. 824-829. DOI 10.1016/j.jinsphys.2012.03.005.

POLASZEK, Andrew, 2006. Two words colliding: Resistance to changes in the scientific names of animals - *Aedes* vs *Stegomyia* [2]. *Trends in parasitology*. 1 février 2006. Vol. 22, pp. 8-9. DOI 10.1016/j.pt.2005.11.003.

PONLAWAT, Alongkot et HARRINGTON, Laura, 2007. Age and Body Size Influence Male Sperm Capacity of the Dengue Vector *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Journal of medical entomology*. 1 juin 2007. Vol. 44, pp. 422-6. DOI 10.1603/0022-2585(2007)44[422:AABSIM]2.0.CO;2.

POWELL, Jeffrey R., 2018. Mosquito-Borne Human Viral Diseases: Why *Aedes aegypti*? *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 6 juin 2018. Vol. 98, n° 6, pp. 1563-1565. DOI 10.4269/ajtmh.17-0866.

POWELL, Jeffrey R et TABACHNICK, Walter J, 2013. History of domestication and spread of *Aedes aegypti* - A Review. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*. 2013. Vol. 108, n° suppl 1, pp. 11-17. DOI 10.1590/0074-0276130395.

PRUDHOMME, Jorian, 2015. *Phlébotomes et écosystèmes: impact des facteurs biotiques et abiotiques sur la structure génétique et phénotypique des populations*. Montpellier.

RATTANARITHIKUL, Rampa, HARBACH, Ralph E, HARRISON, Bruce A, PANTHUSIRI, Prachong, COLEMAN, Russell E et RICHARDSON, Jason H, 2010. Illustrated keys to the mosquitoes of Thailand VI. Tribe Aedini. *Southeast Asian J Trop Med Public Health*. 2010. Vol. 41, pp. 38.

READY, Paul D., 2013. Biology of Phlebotomine Sand Flies as Vectors of Disease Agents. *Annual Review of Entomology*. 7 janvier 2013. Vol. 58, n° 1, pp. 227-250. DOI 10.1146/annurev-ento-120811-153557.

REINERT, John F, 2000. New classification for the composite genus *Aedes* (Diptera: Culicidae: Aedini), elevation of subgenus *Ochlerotatus* to generic rank, reclassification of the other subgenera. And notes on certain subgenera and species. . 2000. Vol. 16, n° 3, pp. 175-188.

REINERT, John F., HARBACH, Ralph E. et KITCHING, Ian J., 2004. Phylogeny and classification of Aedini (Diptera: Culicidae), based on morphological characters of all life stages. *Zoological Journal of the Linnean Society*. novembre 2004. Vol. 142, n° 3, pp. 289-368. DOI 10.1111/j.1096-3642.2004.00144.x.

REISKIND, M. H. et LOUNIBOS, L. P., 2009. Effects of intraspecific larval competition on adult longevity in the mosquitoes *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Medical and Veterinary Entomology*. mars 2009. Vol. 23, n° 1, pp. 62-68. DOI 10.1111/j.1365-2915.2008.00782.x.

REITER, Paul, 1998. *Aedes albopictus* and the world trade in used tires, 1988-1995: the shape of things to come? *Journal of the American Mosquito Control Association*. 1998. Vol. 14, n° 1, pp. 83-94.

REN, Shaoqing, HE, Kaiming, GIRSHICK, Ross et SUN, Jian, 2017. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1 juin 2017. Vol. 39, n° 6, pp. 1137-1149. DOI 10.1109/TPAMI.2016.2577031.

RICHARDS, Stephanie L., PONNUSAMY, Loganathan, UNNASCH, Thomas R., HASSAN, Hassan K. et APPERSON, Charles S., 2006. Host-Feeding Patterns of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Relation to Availability of Human and Domestic Animals in Suburban Landscapes of Central North Carolina. *Journal of Medical Entomology*. 1 mai 2006. Vol. 43, n° 3, pp. 543-551. DOI 10.1603/0022-2585(2006)43[543:HPOAAD]2.0.CO;2.

RISPAIL, Philippe et LÉGER, Nicole, 1998. Numerical Taxonomy of Old World Phlebotominae (Diptera: Psychodidae): 1. Considerations of Morphological Characters in the Genus *Phlebotomus* Rondani & Berté 1840. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*. novembre 1998. Vol. 93, n° 6, pp. 773-785. DOI 10.1590/S0074-02761998000600015.

ROQUE, André Luiz R. et JANSEN, Ana Maria, 2014. Wild and synanthropic reservoirs of *Leishmania* species in the Americas. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*. décembre 2014. Vol. 3, n° 3, pp. 251-262. DOI 10.1016/j.ijppaw.2014.08.004.

ROSSI, E., BONGIORNO, G., CIOLLI, E., DI MUCCIO, T., SCALONE, A., GRAMICCIA, M., GRADONI, L. et MAROLI, M., 2008. Seasonal phenology, host-blood feeding preferences and natural *Leishmania* infection of *Phlebotomus perniciosus* (Diptera, Psychodidae) in a high-endemic focus of canine leishmaniasis in Rome province, Italy. *Acta Tropica*. février 2008. Vol. 105, n° 2, pp. 158-165. DOI 10.1016/j.actatropica.2007.10.005.

SAMANIDOU-VOYADJOGLOU, Anna et HARBACH, Ralph E, 2001. Keys to the adult female mosquitoes (Culicidae) of Greece. *European Mosquito Bulletin*. 2001. Vol. 10, pp. 13-20.

SCHAFFNER, Francis et MATHIEU, Bruno, 2020. Identifier un moustique: morphologie classique et nouvelles techniques moléculaires associées pour une taxonomie intégrée. *Revue Francophone des Laboratoires*. 1 juillet 2020. Vol. 2020, n° 524, pp. 24-33. DOI 10.1016/S1773-035X(20)30228-8.

SCHNEIDER, Jennifer R., MORRISON, Amy C., ASTETE, Helvio, SCOTT, Thomas W. et WILSON, Mark L., 2004. Adult Size and Distribution of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) Associated with Larval Habitats in Iquitos, Peru. *Journal of Medical Entomology*. 1 juillet 2004. Vol. 41, n° 4, pp. 634-642. DOI 10.1603/0022-2585-41.4.634.

SENGHOR, Massila Wagué, NIANG, Abdoul Aziz, DEPAQUIT, Jérôme, FERTÉ, Hubert, FAYE, Malick Ndao, ELGUERO, Eric, GAYE, Oumar, ALTEN, Bulent, PERKTAS, Utku, CASSAN, Cécile, FAYE, Babacar et BAÑULS, Anne-Laure, 2016. Transmission of *Leishmania infantum* in the Canine Leishmaniasis Focus of Mont-Rolland, Senegal: Ecological, Parasitological and Molecular Evidence for a Possible Role of *Sergentomyia* Sand Flies. KAMHAWI, Shaden (éd.), *PLOS Neglected Tropical Diseases*. 2 novembre 2016. Vol. 10, n° 11, pp. e0004940. DOI 10.1371/journal.pntd.0004940.

SHARMA, Umakant et SINGH, Sarman, 2008. Insect vectors of *Leishmania*: distribution, physiology and their control. *J VECTOR BORNE DIS*. 2008. pp. 19.

SIMONYAN, Karen et ZISSERMAN, Andrew, 2015. *Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition* [en ligne]. 10 avril 2015. [Consulté le 21 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <http://arxiv.org/abs/1409.1556>

SKUSE, Frederick A. Askew, 1899. *The banded mosquito of Bengal* [en ligne]. [Consulté le 28 janvier 2022]. Disponible à l'adresse : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Skuse-1894-The_banded_mosquito_of_Bengal.gif

SOUZA-NETO, Jayme A., POWELL, Jeffrey R. et BONIZZONI, Mariangela, 2019. *Aedes aegypti* vector competence studies: A review. *Infection, Genetics and Evolution*. janvier 2019. Vol. 67, pp. 191-209. DOI 10.1016/j.meegid.2018.11.009.

STEPHENS, C. R. et JULIANO, S. A., 2012. Wing Shape as an Indicator of Larval Rearing Conditions for *Aedes albopictus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*. 1 juillet 2012. Vol. 49, n° 4, pp. 927-938. DOI 10.1603/ME12012.

SUMAN, Devi Shankar, SHRIVASTAVA, Anchal R., PANT, S.C. et PARASHAR, Brahma Dutta, 2011. Differentiation of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) with egg surface morphology and morphometrics using scanning electron microscopy. *Arthropod Structure & Development*. septembre 2011. Vol. 40, n° 5, pp. 479-483. DOI 10.1016/j.asd.2011.04.003.

SWAN, Tom, RUSSELL, Tanya L., STAUNTON, Kyran M., FIELD, Matt A., RITCHIE, Scott A. et BURKOT, Thomas R., 2022. A literature review of dispersal pathways of *Aedes albopictus* across different spatial scales: implications for vector surveillance. *Parasites & Vectors*. 27 août 2022. Vol. 15, n° 1, pp. 303. DOI 10.1186/s13071-022-05413-5.

SZEGEDY, Christian, WEI LIU, YANGQING JIA, SERMANET, Pierre, REED, Scott, ANGUELOV, Dragomir, ERHAN, Dumitru, VANHOUCHE, Vincent et RABINOVICH, Andrew, 2015. Going deeper with convolutions. In : *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* [en ligne]. Boston, MA, USA : IEEE. juin 2015. pp. 1-9. [Consulté le 17 octobre 2022]. ISBN 978-1-4673-6964-0. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7298594/>

TABACHNICK, Walter J., 1991. Evolutionary Genetics and Arthropod-borne Disease: The Yellow Fever Mosquito. *American Entomologist*. 1991. Vol. 37, n° 1, pp. 14-26. DOI 10.1093/ae/37.1.14.

TAKKEN, Willem et KNOLS, Bart G.J. (éd.), 2007. *Emerging pests and vector-borne diseases in Europe: Ecology and control of vector-borne diseases* [en ligne]. The Netherlands : Wageningen Academic Publishers. [Consulté le 3 novembre 2022]. Ecology and Control of Vector-borne Diseases. ISBN 978-90-8686-053-1. Disponible à l'adresse : <https://www.wageningenacademic.com/doi/book/10.3920/978-90-8686-626-7>

TARALLO, Viviana D., DANTAS-TORRES, Filipe, LIA, Riccardo P. et OTRANTO, Domenico, 2010. Phlebotomine sand fly population dynamics in a leishmaniasis endemic peri-urban area in southern Italy. *Acta Tropica*. décembre 2010. Vol. 116, n° 3, pp. 227-234. DOI 10.1016/j.actatropica.2010.08.013.

TSAKMAKIDIS, Ioannis, ANGELOPOULOU, Katerina, DOVAS, Chrysostomos I., DOKIANAKIS, Emmanouil, TAMVAKIS, Androniki, SYMEONIDOU, Isaia, ANTONIOU, Maria et DIAKOU, Anastasia, 2017. *Leishmania* infection in rodents in Greece. *Tropical Medicine & International Health*. décembre 2017. Vol. 22, n° 12, pp. 1523-1532. DOI 10.1111/tmi.12982.

TURING, Alan M. et HAUGELAND, J., 1950. *Computing machinery and intelligence. The Turing Test: Verbal Behavior as the Hallmark of Intelligence.*

VALERIO, Laura, MARINI, Francesca, BONGIORNO, Gioia, FACCHINELLI, Luca, POMBI, Marco, CAPUTO, Beniamino, MAROLI, Michele et DELLA TORRE, Alessandra, 2009. Host-Feeding Patterns of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Urban and Rural Contexts within Rome Province, Italy. *Vector borne and zoonotic diseases (Larchmont, N.Y.)*. 1 juillet 2009. Vol. 10, pp. 291-4. DOI 10.1089/vbz.2009.0007.

VALIN, Muriel, 2019. Jeu de go : ce que cache la victoire d'AlphaGo. *Science et vie [en ligne]*. 2019. [Consulté le 17 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://scienceetvie.reworldmediafactory.com/article-magazine/jeu-de-go-ce-que-cache-la-victoire-dalphago>

WILKE, André Barretto Bruno, CHRISTE, Rafael de Oliveira, MULTINI, Laura Cristina, VIDAL, Paloma Oliveira, WILK-DA-SILVA, Ramon, DE CARVALHO, Gabriela Cristina et MARRELLI, Mauro Toledo, 2016. Morphometric Wing Characters as a Tool for Mosquito Identification. MOREIRA, Luciano Andrade (éd.), *PLOS ONE*. 23 août 2016. Vol. 11, n° 8, pp. e0161643. DOI 10.1371/journal.pone.0161643.

WILKERSON, Richard C., LINTON, Yvonne-Marie, FONSECA, Dina M., SCHULTZ, Ted R., PRICE, Dana C. et STRICKMAN, Daniel A., 2015. Making Mosquito Taxonomy Useful: A Stable Classification of Tribe Aedini that Balances Utility with Current Knowledge of Evolutionary Relationships. LIU, Zhong-Jian (éd.), *PLOS ONE*. 30 juillet 2015. Vol. 10, n° 7, pp. e0133602. DOI 10.1371/journal.pone.0133602.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2017. Le point sur la situation mondiale de la leishmaniose, 2006-2015: un tournant dans la surveillance de la maladie. *Relevé épidémiologique hebdomadaire*. 2017. Vol. 92, n° 38, pp. 557-565.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2019. *Global vector control response 2017-2030*. [en ligne]. Geneva : World Health Organization. [Consulté le 8 février 2022]. ISBN 978-92-4-151706-5. Disponible à l'adresse : <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330659>

WU, Jin-Ya, LUN, Zhao-Rong, JAMES, Anthony et CHEN, Xiao-Guang, 2010. Dengue Fever in Mainland China. *The American journal of tropical medicine and hygiene*. 1 septembre 2010. Vol. 83, pp. 664-71. DOI 10.4269/ajtmh.2010.09-0755.

YANG, H. M., MACORIS, M. L. G., GALVANI, K. C., ANDRIGHETTI, M. T. M. et WANDERLEY, D. M. V., 2009. Assessing the effects of temperature on the population of *Aedes aegypti*, the vector of dengue. *Epidemiology and Infection*. août 2009. Vol. 137, n° 8, pp. 1188-1202. DOI 10.1017/S0950268809002040.

Vocanson Juliette

Utilisation de l'intelligence artificielle pour l'identification de vecteurs d'intérêt médical et vétérinaire : application à la reconnaissance d'*Aedes albopictus*, d'*Aedes aegypti* et de *Phlebotomus perniciosus*

Les moustiques et phlébotomes, notamment respectivement les espèces *Aedes albopictus*, *Aedes aegypti* et *Phlebotomus perniciosus*, sont des insectes vecteurs d'agents pathogènes présentant un risque pour l'Homme et les animaux. La reconnaissance de ces espèces est également primordiale, notamment pour décrire leur expansion géographique, notamment pour des zones encore où ces espèces ne sont pas installées de façon pérenne. Les sciences participatives sont de plus en plus utilisées pour identifier et déceler la présence de certains vecteurs dans de nouveaux territoires. Cependant, l'entraînement d'un réseau de neurones à la reconnaissance d'espèces d'insectes à partir de bases de données photographiques d'individus vivants est un domaine où peu d'études ont été réalisées. Les objectifs de ce travail étaient ainsi de constituer une base de données photographiques adaptée à l'entraînement d'un réseau de neurones afin d'évaluer sa capacité de reconnaissance des individus mâles et femelles des trois espèces étudiées. Ce projet s'inscrit dans le cadre plus large de la conception d'une application Smartphone dédiée à la reconnaissance d'insectes afin d'étudier leur répartition et expansion géographique en temps réel.

Mots-clés : Intelligence artificielle ; *Aedes albopictus* ; *Aedes aegypti* ; *Phlebotomus perniciosus* ; vecteurs ; entomologie

Use of artificial intelligence in order to identify vectors of medical and veterinary significance : application to the recognition of *Aedes albopictus*, *Aedes aegypti* and *Phlebotomus perniciosus*

Mosquitoes and sandflies, and in particular the species *Aedes albopictus*, *Aedes aegypti* and *Phlebotomus perniciosus* respectively, are vectors of arthropod-borne pathogens of medical and zoonotic significance. Knowledge of their biology and ecology is necessary to propose an adapted control and to prevent the transmission of vector-borne agents. Identification of these species is also essential, in particular to describe their geographical expansion, especially for areas where these species are not established yet. Citizen science is increasingly used to identify and detect the presence of invasive vectors in new areas. However, training a neural network to recognize insect species from photographic databases of living individuals is an area where few studies have been carried out. The objectives of this work were to build a photographic database suitable for training a neural network in order to assess its ability to classify male and female individuals of the three species studied. This project is part of the design of a Smartphone application dedicated to insect recognition in order to study the geographical distribution and expansion of different species in real time.

Keywords : Artificial intelligence ; *Aedes albopictus* ; *Aedes aegypti* ; *Phlebotomus perniciosus* ; vectors ; entomology