

Application mobile pour l'identification du frelon asiatique

**Travail de Bachelor**

Non Confidentiel

**Département :** TIC

**Filière :** Informatique et systèmes de communication

**Orientation :** Informatique logicielle

Chollet Bastian

23 septembre 2024

Supervisé par :

Dutoit Fabien

# Préambule

Ce travail de Bachelor (ci-après TB) est réalisé en fin de cursus d’études, en vue de l’obtention du titre de Bachelor of Science HES-SO en Ingénierie.

En tant que travail académique, son contenu, sans préjuger de sa valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celles du jury du travail de Bachelor et de l'Ecole.

Toute utilisation, même partielle, de ce TB doit être faite dans le respect du droit d’auteur.

HEIG-VD

Le Chef du Département

Yverdon-les-Bains, le 17 juin 2024

# Authentification

Le soussigné, , atteste par la présente avoir réalisé seul ce travail et n’avoir utilisé aucune autre source que celles expressément mentionnées.

Yverdon-les-Bains, le 17 juin 2024

# Résumé

Cliquez ou appuyez ici pour entrer du texte.

**Table des matières**

[Préambule I](#_Toc176522665)

[Authentification III](#_Toc176522666)

[Résumé V](#_Toc176522667)

[Chapitre 1 Introduction 1](#_Toc176522668)

[1.1 Contexte 1](#_Toc176522669)

[1.2 Cible 1](#_Toc176522670)

[1.3 Identification des besoins 1](#_Toc176522671)

[1.3.1 Besoins fonctionnels 2](#_Toc176522672)

[1.3.2 Besoins non-fonctionnels 2](#_Toc176522673)

[1.4 Objectif 2](#_Toc176522674)

[1.5 Fonctionnalités 2](#_Toc176522675)

[1.5.1 Fonctionnalités principales 2](#_Toc176522676)

[1.5.2 Fonctionnalités optionnelles 3](#_Toc176522677)

[1.6 Planification 3](#_Toc176522678)

[1.7 Organisation 4](#_Toc176522679)

[Chapitre 2 Recherche et état de l’art 5](#_Toc176522680)

[2.1 Modèles deep learning 5](#_Toc176522681)

[2.1.1 État de l’art 6](#_Toc176522682)

[2.1.2 Point de situation sur la recherche 8](#_Toc176522683)

[2.1.3 Solution choisie 8](#_Toc176522684)

[2.2 Datasets 9](#_Toc176522685)

[2.3 Architectures de réseau de neurones 10](#_Toc176522686)

[2.3.1 Architectures proposées 11](#_Toc176522687)

[2.3.2 Résultats obtenus 12](#_Toc176522688)

[2.3.3 Solution choisie 13](#_Toc176522689)

[2.4 Intégration de modèle dans une application cross platform 14](#_Toc176522690)

[2.4.1 Création du modèle 14](#_Toc176522691)

[2.4.2 Export du modèle 14](#_Toc176522692)

[2.4.3 Solution cross platform 16](#_Toc176522693)

[2.4.4 Inférence du modèle sur mobile 18](#_Toc176522694)

[2.5 Modélisation et architecture d’un prototype 18](#_Toc176522695)

[2.5.1 Réalisation du modèle 18](#_Toc176522696)

[2.5.2 Export du modèle 19](#_Toc176522697)

[2.5.3 Réalisation de l’application 19](#_Toc176522698)

[2.5.4 Import et inférence du modèle 19](#_Toc176522699)

[Chapitre 3 Implémentation 22](#_Toc176522700)

[3.1 Architecture 22](#_Toc176522701)

[3.2 Entraînement du modèle 24](#_Toc176522702)

[3.3 Réalisation de l’application de démonstration 24](#_Toc176522703)

[3.4 Réalisation du *Dart Package* 24](#_Toc176522704)

[3.4.1 Contexte 24](#_Toc176522705)

[3.4.2 Implémentation 25](#_Toc176522706)

[Chapitre 4 Conclusion 28](#_Toc176522707)

[Bibliographie 29](#_Toc176522708)

[Annexes 30](#_Toc176522709)

**Table des figures**

[Figure 1 – Diagramme de Gantt de l'organisation générale du projet 4](#_Toc176536901)

[Figure 2 – Types de problèmes traités par la vision par ordinateur. 6](#_Toc176536902)

[Figure 3 – Carte de points chauds d’un modèle de classification 7](#_Toc176536903)

[Figure 4 – Fonctionnement de l’apprentissage par transfert 10](#_Toc176536904)

[Figure 5 – Étapes de convolutions de ShuffleNet 12](#_Toc176536905)

[Figure 6 – Espace mémoire et consommation d'énergie lors d'analyse de 1'000 images 12](#_Toc176536906)

[Figure 7 – Écarts quadratiques moyen par rapport au temps d'inférence 13](#_Toc176536907)

[Figure 8 – Librairies ONNX de flutter 16](#_Toc176536908)

[Figure 9 – Résultat du prototype Android après inférence d'une image 21](#_Toc176536909)

[Figure 10 - Architecture globale 23](#_Toc176536910)

[Figure 11 - Liste des tâches supportées par MediaPipe Flutter 25](#_Toc176536911)

[Figure 12 - Convention d'arborescence pour un Dart package 26](#_Toc176536912)

[Figure 13 - Diagramme de classe de la partie exposée du Dart package 27](#_Toc176536913)

[Figure 14 - Gain de rapidité d'inférence supposé avec XNN Pack 28](#_Toc176536914)

**Liste des tableaux**

[Tableau 1 - Répartition des classes dans le premier dataset étudié 9](#_Toc176430949)

[Tableau 2 - Nombre de paramètres à entrainer selon l'architecture 13](#_Toc176430950)

**Liste des codes sources**

[Code 1 - Snippet d'utilisation du package tflite\_flutter 24](#_Toc176431118)

## Introduction

### Contexte

Le frelon asiatique (*Vespa Velutina*) a été introduit accidentellement en France en 2004 et se répand depuis en Europe. Cette espèce invasive, dont la principale source de nourriture est les abeilles, est combattue par les autorités suisses depuis qu’elle a été identifiée pour la première fois à Genève en 2020. Aujourd’hui elle a colonisé le pied du Jura jusque dans la région bâloise.

Les rencontres avec des frelons, même européens (*Vespa Crabro*), restent exceptionnelle pour la majorité de la population. De ce fait, il n’est pas toujours évident d’identifier correctement l’espèce exacte rencontrée. D’autant plus que le caractère et la taille impressionnante de l’insecte suscite aisément la peur.

En ajoutant que les espèces endémiques doivent être conservées si celles-ci ne présentent aucune menace directe, le travail des autorités peut vite être ralenti si ces dernières interviennent sur des fausses alertes remontées par des citoyens n’ayant aucune connaissance sur l’apparence de l’espèce à éradiquer.

C’est dans ce contexte que nous souhaitons proposer une solution mobile cross-plateforme permettant l’identification de l’espèce nuisible à l’aide de la caméra du téléphone. L’idée principale étant de pouvoir réaliser cette identification à l’aide d’un modèle d’intelligence artificielle (machine learning) embarqué directement sur le téléphone. Une fois l’espèce nuisible identifiée, il sera possible de participer à la localisation du nid en fournissant les images capturées ainsi que les coordonnées géographiques ou les trajectoires de vols.

### Cible

Cette application s’adresse à un large public que celui-ci soit familier avec la technologie ou non. Il s’adresse à tout possesseur de smartphone équipé d’une caméra peu importe le fabricant de ce dernier. Cette solution trouvera son utilité auprès de personnes vivant sur le plateau helvétique ainsi que dans le jura, là où l’espèce a été majoritairement observée. Elle permet à tout un chacun de participer activement dans la lutte contre le frelon asiatique en s’assurant de ne pas fournir d’informations erronées en marquant des espèces endémiques.

L’aspect communautaire en partageant les données de localisations, de trajectoire de vol ainsi que les images capturées seront utiles à toutes les autorités compétentes participant à la destruction des nids. Elles permettent également aux biologistes de mieux observer le territoire occupé par l’espèce ainsi que l’évolution de ce dernier.

Les apiculteurs ou toutes personnes aptes à capturer l’insecte de façon sécurisée pourra également introduire les trajectoires de vols de l’insecte une fois celui-ci relâché. Ces données étant d’autant plus précieuses puisqu’elles permettent une triangulation du nid.

### Identification des besoins

Comme il a été présenté plus haut, l’application se doit de proposer plusieurs fonctionnalités afin de couvrir les besoins énoncés selon le contexte, ainsi que des besoins non-fonctionnel devant s’adapter au public cible.

#### Besoins fonctionnels

* **Accès à l’appareil photo** : L’application doit pouvoir accéder à la caméra du téléphone pour prendre des photos et utiliser les captures obtenues dans l’application.
* **Identification du frelon sur image** : Chaque image capturée doit être analysée et identifiera la présence ou non d’un objet définit en amont par l’application (dans notre cas, le frelon asiatique).
* **Insertion des coordonnées géographiques** : Les utilisateurs doivent disposer d’une solution simple pour indiquer les coordonnées géographiques du lieu de capture de l’image.
* **Tracés sur une carte :** L’application doit permettre à l’utilisateur de saisir des trajectoires de vol sur une carte.
* **Envoi de données à un serveur** : Si le résultat de l’identification s’avère être l’espèce recherchée, l’utilisateur pourra fournir les coordonnées géographiques ainsi que les images capturées à un serveur.

#### Besoins non-fonctionnels

* **Cross-platform** : L’application se doit d’être fonctionnelle que celle-ci soit lancé depuis un appareil Android ou iOS. Ceci doit être transparent pour l’utilisateur.
* **Précision du modèle**: La détection doit être suffisamment précise et ce même sur des images de faibles résolutions ou avec un sujet de petite taille afin que les utilisateurs ne se mettent pas en danger lors de la capture d’images.
* **UI/UX**: L’application doit être simple d’utilisation afin que le plus large publique puisse l’utiliser sans difficultés particulières.

### Objectif

L’objectif principal de ce travail de bachelor est d’explorer la faisabilité d’embarquer un modèle deep learning de reconnaissance d’objets ou de classification d’images dans une solution cross-plateforme. Le défi étant que l’exécution du modèle ne doit pas être déléguée à un serveur, mais réalisée directement sur le smartphone.

Le contexte du projet étant très précis, il est possible que certaines limitations se présentent, notamment concernant la recherche d’un dataset d’images de frelons asiatiques suffisamment fourni et annoté correctement, nécessaire à la construction d’un modèle. Dans l’hypothèse où une telle limitation venait à se présenter, nous préfèrerons contourner les contraintes du contexte initial en choisissant d’autres datasets, sur d’autres cas d’utilisation, afin de mener à terme l’objectif principal.

### Fonctionnalités

Nous avons distingué les besoins en fonctionnalités principales, devant obligatoirement être inclues dans le livrable final, et en fonctionnalités optionnelles qui seront implémentées si le temps le permet.

#### Fonctionnalités principales

* **Photographier** : L’application accèdera à la caméra du smartphone et permettra la capture d’images directement depuis l’application.
* **Analyser l’image** : Une fois la capture réalisée, l’utilisateur pourra la soumettre à une analyse par un modèle de deep learning embarqué qui indiquera si l’image contient bel et bien un frelon asiatique dans le cas où le contexte initial aura pu être respecté.

Si aucune limitation n’a été rencontrée, et que le temps alloué à l’intégration d’un modèle deep learning cross-plateforme aura pris moins de temps qu’initialement prévu, les fonctionnalités suivantes pourront être intégrées :

* **Se localiser** : Afin de faciliter l’entrée de la position où le sujet a été identifié, l’application mettra en place un service de géolocalisation afin de connaître sa position.
* **Envoi des coordonnées géographiques** : L’utilisateur pourra indiquer sur une carte la position relativement exacte de l’endroit où a été identifié le sujet en vue de transmettre les coordonnées géographiques à un serveur distant.
* **Envoi d’images** : Si l’utilisateur le souhaite, il pourra ajouter les images saisies en plus des coordonnées géographiques. Celle-ci devront être encodée pour pouvoir être transmise au serveur distant.

#### Fonctionnalités optionnelles

* **Sauvegarde locale** : Un système de sauvegarde local permettra à l’utilisateur de reprendre une saisie interrompue de façon volontaire ou involontaire.
* **Tracé de trajectoire de vol** : Si l’utilisateur souhaite réaliser une triangulation du nid en ayant capturé des spécimens identifiés en amont, il pourra indiquer sur une carte la direction du vol du sujet à l’aide d’un glissement de doigt.
* **Envoi des trajectoires de vol** : De la même façon que l’utilisateur transmets des coordonnées géographiques, il pourra transmettre les trajectoires indiquées
* **Consultation de l’historique des données** : Le serveur distant stockera les données reçues et il sera possible de consulter ces données à tout moment.

### Planification

Ce rapport sera divisé en plusieurs sections retraçant le parcours réflexif effectué ainsi que les implémentations réalisées. En premier lieu, un état de l’art sera réalisé afin d’identifier les technologies disponibles en termes de classifications d’images, de langages de programmation cross platform, et de librairies permettant l’intégration de modèle deep learning sur mobile. Nous pourrons ainsi situer le projet sur l’existant tout en relevant les points nécessitant des approfondissements.

Par la suite de nos observations, nous entrainerons un modèle de classification d’image en utilisant les outils analysés à notre avantage. Nous mettrons en évidence le déroulé de l’implémentation, les obstacles rencontrés et comment ceux-ci ont été surmontés.

Une fois le modèle à notre disposition, nous documenterons l’implémentation de la solution permettant son intégration dans une application mobile de démonstration. Il s’agira ici de détailler les différents composants de l’application en mettant l’accent sur les points-clés comme les différents packages installés et leurs utilisations.

Un point de situation servira de conclusion à ce rapport, faisant état du projet à la fin du temps imparti. Nous parlerons des éventuels retards et de leurs impacts sur le résultat final. Nous comparerons l’état actuel du projet avec les objectifs initiaux et nous finirons par les différents axes d’améliorations qu’il serait possible d’exploiter pour porter ce projet vers d’autres horizons.

### Organisation

Une image contenant texte, ligne, Tracé, Parallèle

Description générée automatiquementL’organisation globale peut être consultée via le digramme de Gantt ci-dessous.

Figure 1 – Diagramme de Gantt de l'organisation générale du projet

## Recherche et état de l’art

Ce chapitre contient l’état de l’art des technologies disponibles et utiles à ce travail de Bachelor. Il est divisé en plusieurs sections, chacune traitant un bloc composant l’application.

Pour rappel, nous parlerons ici des différents types de modèle deep learning se prêtant au mieux à l’identification du frelon asiatique, puis nous réaliserons une synthèse des différents jeux de données trouvés en exposant leurs forces et limitations. Une fois ces deux éléments choisis, nous pourrons statuer sur une architecture pré-entrainée adaptée à une utilisation sur plateforme mobile.

Ensuite, nous nous concentrerons sur la recherche de solutions existantes ou non permettant la réalisation de l’intégration d’un modèle deep learning entrainé à une application cross platform. Dans un premier temps, cette section sera indépendante du modèle deep learning choisi puisque nous sommes, dans l’idéal, à la recherche d’une solution faisant abstraction de la couche machine learning. La solution ne devant pas être couplée au modèle exporté qu’on lui fournit.

Finalement, une analyse architecturale mettra les éléments retenus jusqu’ici en commun et explicitera leurs intégrations dans l’application prototype finale.

### Modèles deep learning

Plusieurs fois au cours de ce rapport, nous avons fait mention de modèle « deep learning ». Notons ici que le terme est générique et ne définit pas un modèle à proprement parlé. Il s’agit plutôt d’une famille d’apprentissages automatiques fondée sur l’apprentissage de représentations de données. Dit autrement, le terme définit une technique utilisée par un ensemble de modèles comme l’extraction de caractéristique dans une image, dans un son, une vidéo, etc... Toutefois, par souci de simplicité, nous utiliserons ce terme pour parler de modèles de machine learning traitant des images au travers d’un réseau neuronal convolutif.

Le réseau de neurones convolutifs (CNN[[1]](#footnote-1)) sont un élément fondamental pour la vision par ordinateur. Depuis son invention en 1988 par Kunihiko Fukushima, il a été largement amélioré et agrémenté de nouvelles possibilités au cours des 12 dernières années avec l’augmentation de puissance des processeurs graphiques (GPU) et la démocratisation de l’intelligence artificielle générative. Ils ont donc la possibilité de répondre à diverses tâches comme la classification d’images, la détection d’objet et la segmentation d’images. Nous allons développer ces trois dernières tâches car elles représentent des solutions pertinentes à notre situation.

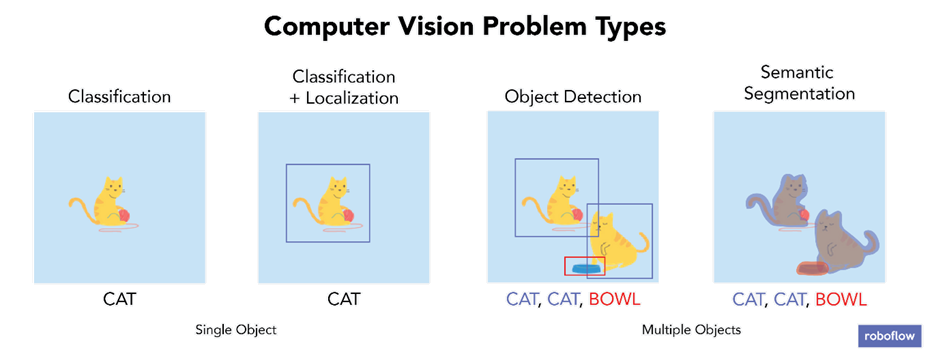


Figure 2 – Types de problèmes traités par la vision par ordinateur.

La vision par ordinateur permet la résolution de plusieurs types de tâches comme la classification, la détection d’objet ou la segmentation sémantique

#### État de l’art

Certaines techniques ont été volontairement omises dans ce rapport car jugées trop complexes pour les besoins de ce travail. C’est le cas notamment de la segmentation d’image, présentée dans la Figure 1, ou de la détection de points clés (technique ayant pour but d’identifier certains points importants d’un objet dans une image, comme les jambes et bras d’une personne).

##### Classification d’images

Nous entendons par classification d’image, le processus permettant de catégoriser l’appartenance d’une image à une classe parmi celles d’un ensemble prédéfini. Plus particulièrement dans cette tâche, il s’agit de porter un regard sur l’ensemble de l’image sans spécifier au modèle les régions d’intérêts permettant de prédire la classe correctement. Par conséquent, et comme le démontre la 1e image de gauche de la **Figure 2**, cette technique applique une seule classe par entrée.

###### Avantages

Ce type de modèle constitue une base qui sera présente dans tous les autres que nous traiterons ici. De ce fait, l’architecture de ces modèles seront souvent moins complexes que les autres tâches ce qui pourrait avoir de nombreux avantages bénéfiques sur une plateforme mobile.

Nous pouvons, par exemple, penser à l’espace mémoire moindre occupé par de tels modèles, mais aussi à des temps d’exécution plus courts ou à des besoins en ressources plus faible, ce qui peut s’avérer critique pour des modèles de smartphone d’entrée de gamme.

L’entraînement de tels modèles pourraient également s’avérer plus rapide, bien que pour ce travail, il ne s’agisse pas vraiment d’un avantage à considérer étant donné que l’entraînement sera réalisé sur un ordinateur disposant de d’avantages de ressources.

###### Limitations

Les limitations que présentent un classificateur d’images sont essentiellement liées à la précision de ce dernier. Puisque nous n’indiquons pas la région d’intérêt dans l’image permettant de déterminer sa classe, nous perdons un certain contrôle sur le fonctionnement même du modèle. Ce dernier pourrait, par exemple, déterminer la classe « frelon asiatique » en se basant sur l’arrière-plan de l’image car dans la majorité des cas, les photos de l’insecte ont lieu dans un décors naturel, résultant ainsi par des faux négatifs lorsque l’image reçue présente une scène en intérieur. La **Figure 3** illustre un cas similaire où un modèle apprend la classe « cheval » non pas en détectant l’animal, mais en détectant le watermark présent sur la photo. Ainsi, placer ce watermark sur n’importe quelle autre image aura pour effet que le modèle labellise cette image comme étant un cheval.

Une image contenant texte, capture d’écran, graphisme

Description générée automatiquement

Figure 3 – Carte de points chauds d’un modèle de classification

En h. à g. le modèle identifie la classe "cheval" non pas grâce à la présence de l'animal, mais grâce au watermark. La présence de ce dernier dans une image sans cheval se verra tout de même attribuer la classe éponyme

L’autre défaut que présente les classificateurs sont leur difficulté à identifier correctement une classe si le sujet de l’image est trop petit ou occulté. Il s’agit d’une conséquence directe au fait que le modèle utilise l’image dans sa totalité pour déterminer une classe. Puisque, dans notre cas, nous nous intéressons à des sujets de petites tailles et dont les photographies risquent d’être prises à des points de vue distants, cela pourrait s’avérer être une limitation importante à considérer, d’autant plus si on ajoute à cela les faibles zooms des appareils mobiles et la résolution basse des appareils d’entrée et milieu de gamme.

##### Détection d’objets

La détection d’objets est un procédé disposant de nombreux cas d’utilisations comme le pilotage de véhicules autonomes ou la surveillance par vidéo. Comme le montre la 3e image de la **Figure 2**, il ne s’agit plus de classifier une image dans son ensemble, mais d’identifier une région dans celle-ci et de lui attribuer une classe (voir, dans certains cas, une probabilité d’appartenance à cette dernière).

Ce procédé ouvre la porte à la détection de multiples objets au sein d’une même image, chaque objet pouvant être attribué à une classe distincte.

Par le passé, ce procédé nécessitait l’utilisation d’un CNN pour établir des régions de proposition dans l’image puis un autre réseau pour établir une classification pour chaque région. Ces dernières années, d’autre architectures ont vu le jour permettant d’accélérer ce processus et permettant la sélection de régions et la classification en une seule étape.

###### Avantages

Les résultats des détecteurs d’objets sont plus facilement interprétables une fois l’image analysée par le modèle. Plutôt que d’obtenir une simple classe, nous disposerons également d’une région où se trouve l’élément identifié, sa taille et également la probabilité d’appartenance à la classe. Cela peut s’avérer être avantageux afin de mieux identifier ce que le modèle voit. Cette caractéristique s’avèrerait fortement pratique si on dispose d’un cliché d’une ruche d’abeille attaquée par un frelon. Le modèle pourrait mettre en avant l’insecte dans l’image

Il est plus facile de guider le modèle sur les caractéristiques de l’objet à identifier via le positionnement de l’objet dans l’image. On réduit ainsi l’activation neuronale des zones non pertinentes pour la classification.

Par extension, les détecteurs d’objets apprennent mieux des images où le sujet est occulté, difforme ou de petite taille puisque nous aiguillons la zone à analyser limitant les comportements imprévisibles qui pouvaient naître des classificateurs.

Comme mentionné précédemment, les images à analyser pourront certainement inclure des insectes de petites tailles, en mouvement (donc partiellement flou) ou pris en photo de loin. La détection d’objets pourrait s’avérer plus performante pour identifier un frelon asiatique dans ces scénarios.

La détection d’objet offre la possibilité de classifier plusieurs éléments au sein d’une même image. Ce qui n’est pas possible dans un classificateur.

###### Limitations

Les architectures pré-entrainées de détection d’objet peuvent présenter de grandes différences les unes avec les autres ce qui aura, par conséquence, de fortes variations dans les performances et les ressources nécessaires. Cela est également vrai pour le temps d’apprentissage et d’exécution.

Dans la globalité, ces modèles prennent plus d’espace mémoire et consomment d’avantages de ressources qu’un simple classificateur. Ces ressources étant de facto plus faibles sur mobile, certaines architectures pourraient mal fonctionner ou ne pas fonctionner du tout. Le temps d’exécution pourrait également s’en trouver augmenté.

La réelle nécessité de détecter la position de l’objet est discutable. Même si elle apporte de précieuses informations quant au fonctionnement du modèle et offre d’avantages de scénarios d’utilisation, les contraintes que le modèle peut imposer à un téléphone mobile peuvent péjorer le choix de cette solution. En plus de cela, la détection d’objets s’utilise davantage dans des contextes vidéo où il y a une nécessité de suivre la position d’un objet au cours du temps.

#### Point de situation sur la recherche

Avant d’orienter notre choix vers une solution adaptée à notre problématique, il est important de souligner le fait que la recherche actuelle sur l’intégration de modèles deep learning sur téléphones mobiles n’est pas un sujet traité de façon exhaustive. Les recherches que nous avons trouvées se concentrent bien trop souvent sur un nombre d’architecture limité, ou en exécutant les modèles sur un faible nombre de smartphone voir dans certains cas en ignorant complètement l’aspect cross-platform en excluant volontairement certains OS.

Il en découle des résultats variés et variables exposant des métriques différentes. Certaines études mettent en lumière les coûts en termes de temps et de consommation de batterie, alors que d’autres mettent en avant la précision du modèle et le nombre de paramètre de ce dernier.

Ainsi, les observations jusqu’ici ont été faites sur un ensemble faible d’études. Toutefois, puisque l’objectif principal de ce travail s’axe plutôt sur la faisabilité de l’intégration du modèle deep learning sur un smartphone, les informations récoltées sont suffisantes pour nous orienter sur un choix éclairé.

#### Solution choisie

Les deux techniques présentées ci-dessus nous ont semblé être les plus pertinentes et adaptées pour ce projet. Nous avons décidé d’orienter notre choix final sur une technique de classification d’image.

En effet, les contraintes de ce modèle peuvent être aisément contournée pour les besoins de ce travail. Tout d’abord, nous n’avons pas réellement besoin d’identifier plusieurs éléments au sein d’une même image. À termes, nous pourrions imaginer que l’application envoie le cliché à un serveur accessible par des autorité, permettant à un œil humain d’identifier plusieurs individus sur l’image reçue.

En second temps, la problématique liée au sujet de l’image qui serait trop petit peut être contournée si on invite l’utilisateur à recadrer son cliché en ne sélectionnant que la zone contenant l’insecte à identifier. Cela permet non seulement aux utilisateurs de saisir le cliché depuis un point de vue éloigné à des fins sécuritaires tout en obtenant une image avec un sujet mieux centré et finalement plus facile à reconnaître.

Les classificateurs d’images offrent une solution simple à entraîner et à utiliser et s’avèrent donc être de bons candidats pour tester leur portabilité dans un téléphone. Les autres avantages qu’ils ont à offrir dans notre contexte ont d’ores et déjà été explicité plus haut.

### Datasets

La section précédente nous a fait nous orienter sur une tâche de classification d’images. De ce fait, nous devons désormais rechercher un jeu de données contenant des images du frelon asiatique annotées pour entrainer notre modèle.

Le *Vespa Velutina* étant une espèce invasive dans plusieurs pays dont notamment la France et l’Espagne, cette espèce a déjà été le sujet d’observations et de nombreux clichés divers et variés sont trouvable sur internet. L’idéal étant de disposer d’un ensemble de cliché annoté correctement, ce qui est chose possible au travers de diverses plateformes web mettant à disposition des datasets en open source comme *Roboflow*[[2]](#footnote-2).

À la date de la mise en ligne du sujet de ce travail, un premier jeu de donnée a été suggéré[[3]](#footnote-3). Ceci disposait de 589 images annotées répartie sur 5 classes de la façon suivante :

|  |  |
| --- | --- |
| Classes | Nombre d’images |
| *Asian Hornet* (Frelon asiatique) | 280 |
| *Bee* (Abeille) | 103 |
| *Hornet* (Frelon non-asiatique) | 99 |
| *Wasp* (Guêpe) | 94 |
| *Null* (Aucun) | 13 |

Tableau 1 - Répartition des classes dans le premier dataset étudié

Bien que ce dataset mettent à disposition un ensemble de classes pertinentes pour notre besoin, il reste néanmoins de taille trop faible pour espérer une précision suffisante. D’autant plus que les différentes classes sont mal équilibrées. Nous pourrions réduire le nombre de classe à 2 en regroupant les images ne contenant pas de frelons asiatiques en une seule catégorie, mais dans tous les cas, il serait nécessaire de procéder à de l’augmentation de données avec un tel jeu.

Nos recherches ont conduit à d’autres données annotées[[4]](#footnote-4) de 7675 images de frelons asiatiques. À la différence du jeu précédent, celui-ci ne propose qu’une seule classe. Néanmoins, il dispose également d’une version avec augmentation de donnée, élevant le nombre total d’image à 18'425. Les opérations d’augmentations comprennent des rotations, des rognages, de changements de luminosité, de flou et d’exposition.

Cette large ressource pourrait s’avérer excellente pour disposer d’un modèle suffisamment précis. Toutefois, il sera nécessaire d’agrémenter ces données d’une classe additionnelle contenant des images diverses et variées, voir des insectes à exclure pour affiner le modèle à ne détecter que l’espèce recherchée. L’autre solution consisterait à procéder à de l'apprentissage par transfert en sélectionnant un modèle pré-entraîné sur un ensemble de classe. Nous pourrions, par exemple, sélectionner un modèle entrainé sur un dataset particulier et le renforcer en y ajoutant notre nouvelle classe. La **Figure 4** illustre le fonctionnement de l’apprentissage par transfert.

Une image contenant texte, capture d’écran, diagramme, Police

Description générée automatiquement

Figure 4 – Fonctionnement de l’apprentissage par transfert

En haut, un premier modèle entrainé à identifier des chiens. En bas, ce modèle est réutilisé et affiné pour permettre la détection de chat et de chien

En conclusion, nous porterons notre choix sur ce deuxième jeu de donnée. Celui-ci nous permet de retirer une partie du travail nécessaire pour disposer d’un panel large d’image puisqu’il a déjà été augmenté. Ainsi, nous nous assurons de disposer de données suffisamment fournies pour mener à bien l’entraînement du modèle et garantir une certaine qualité quant à sa précision.

Il sera toutefois nécessaire d’agrémenter ce jeu avec d’autres données et de disposer d’une annotation pour cette nouvelle classe à introduire et/ou de rechercher un modèle pré-entrainé sur lequel nous pourrons aisément appliquer de l’apprentissage par transfert.

### Architectures de réseau de neurones

Par architectures de réseau de neurones nous parlons de toutes les structures de réseaux convolutifs existantes et découvertes au travers de la recherche. En effet, si nous souhaitons obtenir un modèle final le plus précis possible, il est préférable de se baser sur des architectures existantes.

Plusieurs paramètres sont à prendre en considération pour sélectionner un modèle performant sur mobile. Pour commencer, celui-ci doit disposer d’un nombre de paramètre le plus faible possible. En effet, si le nombre de paramètre est trop élevé, le modèle prendra plus d’espace mémoire et son temps d’exécution se verra rallongé. Or, sur un mobile, ces ressources sont plus faibles qu’un serveur ou même un ordinateur.

En second temps, nous devons considérer le temps de traitement, appelé aussi temps d’inférence. Un modèle lent à l’exécution pouvant entraîner des conséquences néfastes sur l’expérience utilisateur.

En troisième, le modèle doit avoir une consommation en énergie la plus faible possible. Une application ou le traitement d’image est gourmand en énergie sera inutilisable si on souhaite performer l’opération plusieurs fois.

Finalement, l’architecture retenue doit offrir une bonne précision. Ce point pouvant être impacté si nous tentons de satisfaire les autres cités précédemment. Il nous faudra donc trouver un équilibre entre performances sur mobile et qualité du modèle.

Notre investigation se base sur un travail de recherche (Bhatt, et al., 2021) visant à mesurer les performances de différentes architectures CNN sur mobiles dans un contexte de détection de mouvement d’yeux (*eye tracking*).

#### Architectures proposées

Le papier se focalise sur 4 architectures dont 3 d’entre elles ont pour point commun le fait qu’elles ont toutes été dimensionnées afin de maximiser les précisions obtenues sur le set ImageNet[[5]](#footnote-5). Nous vous proposons ci-dessous une rapide présentation de ces dernières.

##### LeNet-5

Il s’agit de l’architecture la plus simple en termes de structure. En effet, elle n’est constituée que de 5 couches dont 2 convolutives et 3 entièrement connectées. Malgré sa simplicité, elle s’avère efficace pour des tâches peu complexes et propose un nombre de paramètres faible ainsi qu’un temps d’inférence rapide.

##### AlexNet

Évolution de l’architecture précédente, elle rajoute 2 couches de convolution supplémentaires et une couche entièrement connectée supplémentaire. Elle performe mieux que LeNet-5, mais dispose également d’un nombre de paramètre très élevé, 1’000 fois plus que LeNet-5.

##### MobileNet-V3

Avec sa première version créée en 2017, MobileNet est une des premières tentatives d’architecture pensée pour des systèmes embarqués. Sa particularité réside dans son traitement des couches convolutives qui divisent les kernels normalement obtenu en deux. Par exemple, plutôt que d’obtenir un kernel 3x3 en sortie, le modèle créera un kernel 3x1 et 1x3. Cette technique réduit le nombre d’opérations nécessaire pour effectuer la convolution.

##### Shufflenet-V2

Dans la même optique de vouloir apporter une architecture légère pour être fonctionnel sur des systèmes embarqués, Shufflenet, dans sa deuxième version, propose de séparer les canaux (par exemple R, V et B) en deux. Les couches de convolution vont alors extraire des caractéristiques sur les images, puis ces caractéristiques seront mélangées (*Shuffle*) aux autres, créant de nouveaux kernels contenant les caractéristiques des différents canaux. Contrairement à MobileNet, le nombre de canaux en entrée et sortie reste identique. La **Figure 5** illustre le procédé de cette architecture lorsque celui-ci était encore à sa première version.

Les performances théoriques de ce modèle sont relativement similaires à ceux de MobileNet.

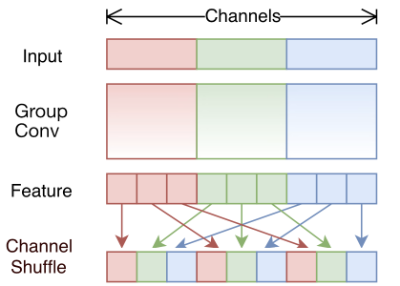


Figure 5 – Étapes de convolutions de ShuffleNet

Dans sa première version, l'architecture effectuait également un regroupement des couche 1x1. Ceci a été abandonné dans la V2

#### Résultats obtenus

L’étude a donc testé ces 4 architectures sur deux appareils mobiles : *le Samsung Galaxy S9* et le *Samsung Galaxy J7*. À noter que les chercheurs sont allés plus loin en proposant des architectures différentes. Ainsi, en plus de tester ces modèles directement embarqué sur les téléphones mobiles, ils ont également testé les performances si ces derniers déléguaient la tâche à un serveur proche (*Edge*) ou sur une infrastructure dans le cloud. Nous ne nous intéresserons qu’aux performances obtenues lorsque le modèle est présent sur les smartphones directement.

En ce qui concerne les performances en termes d’espace mémoire et de consommation de batterie, les résultats observés sont les suivants. Toutes les mesures ont été effectuées sur une tâche de classification de 1'000 images. La **Figure 6** affiche les résultats sous la forme d’un histogramme pour les deux modèles de smartphones utilisés.

Une image contenant capture d’écran, texte, Tracé, ligne

Description générée automatiquement

Figure 6 – Espace mémoire et consommation d'énergie lors d'analyse de 1'000 images

On remarque qu’AlexNet est le modèle ayant le plus d’impact sur l’usage de la mémoire et la consommation de batterie, ce qui n’est guère surprenant car il s’agit du modèle disposant du plus grand nombre d’hyperparamètres. Pour rappel, les nombre de paramètres des différents modèles est présenté dans le **Tableau 2.**

|  |  |
| --- | --- |
| Architecture | Nombre approximatif de paramètres |
| *LeNet-5* | 60’000 |
| *MobileNet-V3* | 5.4 Mio |
| *ShuffleNet-V2* | 7.4 Mio |
| *AlexNet* | 60 Mio |

Tableau 2 - Nombre de paramètres à entrainer selon l'architecture

Une image contenant texte, capture d’écran, diagramme, Tracé

Description générée automatiquementDe ce fait, on constate une corrélation entre le nombre de paramètre du modèle et sa taille en mémoire ainsi que sa consommation de batterie. En tant que tel, le nombre de paramètres n’est pas une information suffisante pour orienter notre choix, nous devons également observer la précision et le temps d’inférence du modèle. La **Figure 7** représente ceci en séparant les données par architecture mais aussi pas méthodologie utilisée. Dans notre cas, seul le « On-device inference » nous intéresse.

Figure 7 – Écarts quadratiques moyen par rapport au temps d'inférence

Si on observe les cercles dans le schéma ci-dessus, on constate également une corrélation entre le nombre de paramètre de l’architecture et le temps d’inférence. Ainsi, on retrouve AlexNet comme architecture avec le temps le plus élevé.

Ce schéma nous donne également l’indication que malgré les avantages en termes de consommation de ressource que peut offrir LeNet-5, cette architecture restent la moins performante en termes de précision.

L’architecture MobileNet-V3 et ShuffleNet-V2 sont toutes deux similaires en termes de performances. La première semble toutefois disposer d’une précision légèrement plus élevée. Nous choisirons donc une architecture MobileNet-V3 tout en conservant ShuffleNet-V2 comme alternative si besoin.

#### Solution choisie

L’architecture MobileNet-V3 dispose de nombreuses qualités démontrées au cours de cette étude qui oriente notre choix sur elle. En effet, même si cette architecture n’est, à priori, pas la plus rapide en termes d’exécution, elle offre en contrepartie une précision plus élevée ainsi qu’une consommation d’énergie et de mémoire moindre sur plateforme mobile.

Nous n’écartons toutefois pas la possibilité d’utiliser une architecture basée sur ShuffleNet-V2 si cette dernière s’avère plus performante lors de nos expérimentations.

### Intégration de modèle dans une application cross platform

Cette section s’intéresse aux différentes étapes et solutions logiciels existantes qui permettent à terme de transposer un réseau de neurones convolutifs sur une plateforme mobile. Ce procédé passe par plusieurs étapes. Du choix de la librairie permettant de réaliser le modèle à son inférence sur mobile en passant par le choix du framework cross-platform. Nous tenterons d’exposer dans cette section, les différentes étapes ainsi que les solutions existantes.

#### Création du modèle

Dans le domaine de la recherche et dans le domaine professionnel, Python s’avère être le langage de programmation de prédilection en ce qui concerne la data science et par extension le machine learning. Ceci grâce à une communauté large et bien établie.

De surcroît, de grosses entreprises tel que Google et Meta ont investi dans le développement de librairie open source afin de faciliter l’apprentissage et la prise en main de ces outils. Nous pouvons retrouver Google derrière les librairies *TensorFlow* et *Keras*, et en ce qui concerne Meta, cette dernière est la créatrice de *PyTorch*.

Ces trois solutions facilitent l’accessibilité de la création de modèles deep learning. Chacune disposant d’avantages et inconvénients qui leur sont propres. *TensorFlow*, par exemple, dispose d’une API de plus bas niveau que *PyTorch* ou *Keras* donnant un plus large contrôle sur les détails d’implémentations et d’optimisation du modèle deep learning.

*PyTorch* et *Keras*, quant à eux, souhaitent mettre à disposition une API de haut niveau dans l’objectif de permettre aux utilisateurs de créer des prototypes fonctionnels rapidement en offrant un grand niveau d’abstraction en ce qui concerne le nombre de couches, et les valeurs des hyperparamètres. Cette approche est certes plus limitée dans des cadres de recherche avancée en machine learning, mais se prête très bien à notre contexte où le modèle en soit n’est pas l’objectif principal.

Notons également le fait que puisque que *Keras* et *TensorFlow* ont été développé par Google, ces deux librairies disposent d’une intégration commune. Ainsi, il est possible de disposer facilement des fonctionnalités de *TensorFlow* au travers de l’API de *Keras.* Par ce procédé, ces deux librairies deviennent un choix souvent préféré à *PyTorch*.

En plus de celles susmentionnées, *TensorFlow* offre d’autres fonctionnalités que nous détaillerons plus bas dans ce rapport. La suite de cette section détaillera aussi notre utilisation de cette librairie et pourquoi cette dernière nous a convaincus.

#### Export du modèle

Rappelons que nous souhaitons procéder à l’inférence du modèle directement sur la plateforme mobile. De ce fait, une solution développée au moyen d’un script python ne sera pas utilisable en tant que tel. Heureusement, il existe plusieurs formats de fichier et de méthode d’export permettant l’utilisation de modèles entraînés sur d’autres appareils.

##### TensorFlow Lite

L’approche la plus instinctive consisterait à utiliser directement les outils fournis par *TensorFlow* et plus particulièrement *TensorFlow Lite.* Il s’agit d’une librairie réalisée spécialement pour porter des modèles entrainés via *TensorFlow* ou *Keras* sur des plateformes mobiles.

En plus de fournir un format de fichier exportable, la librairie met également à disposition un ensemble d’outils pour optimiser le modèle lors de son exportation. Nous pouvons par exemple souligner la possibilité de quantifier le modèle afin que celui-ci utilise des entiers sur 8 bits plutôt que des nombres à virgules flottantes sur 32 bits. Ce procédé permet une simplification des calculs à effectuer sur la machine hôte, en particulier si celle-ci dispose de ressources matérielles limitées.

Le seul réel inconvénient de cette méthode et qu’il n’est, à l’heure actuelle, pas possible de transposer les libellés des classes dans le fichier exportable. Ainsi, il est nécessaire de fournir en annexe du modèle un fichier textuel contenant les libellés. Cela peut poser plusieurs inconvénients dans un contexte où nous disposons de beaucoup de classes. Dans notre cas, puisque le modèle sera binaire (2 classes), il ne sera probablement même pas nécessaire de fournir de libellés, puisque la sortie unique du modèle pourra être directement interprétée.

##### Open Neural Network Exchange (ONNX)

Il s’agit d’un écosystème d’intelligence artificielle open source ayant pour but de standardiser les opérations et les fichiers d’export afin d’assurer une interopérabilité entre les différents frameworks de machine learning. Cette initiative a été lancée par Meta et Microsoft en 2017 et a été rapidement soutenue par d’autres grandes industries comme AMD, Intel et ARM pour ne citer qu’eux.

Du fait du soutien d’industriels importants, c’est naturellement que nous retrouvons la possibilité d’exporter un modèle *Keras* ou *TensorFlow* au format ONNX.

Toutefois, ONNX définit un format de modélisation. Si nous souhaitons réutiliser un modèle exporté via ce standard, nous devons employer un autre outil : ONNX Runtime. Or, au moment de la rédaction de ce rapport, cet outil est limité à certains langages. En ce qui concerne le cross-platform, seul React Native dispose d’une solution ONNX Runtime officielle. En ce qui concerne d’autres langages cross platform, comme Flutter, seules des librairies non-officielles publiées par des utilisateurs non-vérifiés sont disponibles. La **Figure 8** illustre le résultat de recherche sur le site de package de Flutter pub.dev. On y retrouve un ensemble de produit aux popularités variables. En comparaison, l’intégration avec React Native est directement documentée sur le site de ONNX Runtime[[6]](#footnote-6). L’utilisation de ces librairies tierces nous semble donc une mauvaise piste et plus risqué qu’avec celle de *TensorFlow Lite*.

Une image contenant texte, capture d’écran, document, Police

Description générée automatiquement

Figure 8 – Librairies ONNX de flutter

Liste des libraries retournées lors d'une recherche sur le site pub.dev. On y voit des popularités variables et des nombres de "likes" faibles, indiquant des utilisations faibles ou une communauté restreinte

Toujours concernant Flutter, il serait possible de contourner cette limitation en passant par l’intégration C++ du ONNX Runtime via le Foreign Function Interface (FFI) de Dart. Cela consiste à employer les outils fournis par Flutter afin de générer du code Android et iOS dans leur version native en C++.

##### Solution choisie

Comme mentionné, la solution la plus instinctive serait d’utiliser *TensorFlow Lite*. Son intégration avec la librairie *Keras* facilite grandement l’export du modèle tout en mettant à disposition des outils simples pour optimiser son inférence sur un smartphone. Ces outils nous permettrons de réduire grandement le temps nécessaire à la gestion de l’export du modèle sur d’autres appareils, c’est pour cela que nous porterons notre choix sur cette technologie.

À contrario, le standard ONNX impose des contraintes et n’est pas supporté de façon officielle sur d’autres langages cross platform que React Native. Le passage par le code natif en C++ nous semblant trop fastidieux et complexe pour être une solution fonctionnelle à court terme.

#### Solution cross platform

Dans un premier temps, et pour mener à bien l’objectif principal de ce projet, nous devons disposer d’une solution déployable à la fois sur Android et iOS. Ainsi, le langage utilisé importe peu tant que celui-ci dispose d’un écosystème développé et d’une communauté active nous permettant d’implémenter les solutions présentées jusqu’ici.

Idéalement, et si le temps le permet, il serait intéressant d’explorer une solution faisant abstraction du langage utilisé. Une piste à explorer serait d’implémenter une solution en code natif C++ exposant une API qui pourra être utilisée soit en React Native soit en Flutter, ou en tout autre langage cross plateforme disposant d’une solution permettant l’intégration de librairie C++. Notons également que *TensorFlow Lite* est disponible en C++.

Cette solution « universelle » repose sur un défi de taille. Toutefois, React Native et Flutter disposent tous deux d’outils permettant la réalisation de code natif C++ transposable par la suite à la fois sur iOS et Android. Par exemple, React Native met à disposition ce qu’ils appellent le « Native Module[[7]](#footnote-7) » permettant l’appel de code C++ depuis le langage JavaScript. De même flutter permet le même procédé via le « Foreign Function Interface » mit à disposition par le langage Dart. Cependant, la documentation concernant ces deux techniques reste relativement légère. À l’heure actuelle, et sans expérimentation, il est difficile d’estimer la complexité ainsi que la durée de travail d’une telle implémentation.

À prendre en compte également qu’à la rédaction de ce rapport, React Native est en phase de terminer le déploiement de sa « Nouvelle architecture[[8]](#footnote-8) », prévue selon eux « à la fin de 2024 ». Bien qu’il soit mentionné explicitement que cette version est en phase expérimentale et qu’il est donc préférable d’éviter de l’utiliser immédiatement, il est, de surcroît, indiqué qu’elle affectera l’utilisation des Natives Modules qui seront dépréciés lors du déploiement de la nouvelle architecture, laissant la place à d’autres implémentation que sont Turbo Native Module[[9]](#footnote-9) et Fabric Native Components[[10]](#footnote-10). Par conséquent, il est important de souligner qu’une solution développée en React Native lors de ce projet risque de devenir obsolète dans les mois à venir.

En conséquence, et dans le cadre d’une solution cross-platform Android et iOS uniquement, nous préfèrerons l’utilisation du framework Flutter qui semble disposer d’une version plus stable dans la fenêtre de temps imparti pour la réalisation de ce projet. Nous n’excluons pas complètement React Native, mais nous préférons garder son utilisation si nous venions à réaliser une solution « universelle » adaptable à plusieurs langages cross platform.

#### Inférence du modèle sur mobile

Récapitulons l’ensemble des technologies choisie jusqu’ici :

* Nous disposerons d’un modèle dont l’implémentation aurait été réalisée à l’aide de *Keras* et *TensorFlow*.
* Le modèle sera ensuite exporté dans un fichier unique auquel nous pourrons, si nécessaire, ajouter un fichier textuel supplémentaire définissant les libellés de nos classes.
* L’inférence du modèle sera développée grâce au framework Flutter.

À présent, nous devons sélectionner les technologies nous permettant d’importer et d’exécuter le modèle au format *TensorFlow Lite* via Flutter. Par chance, il s’avère que toutes les technologies utilisées ici sont des créations de Google. Ainsi, il nous a été relativement simple de trouver une solution officielle maintenue par *TensforFlow* eux-mêmes. Il s’agit d’un plugin nommé *tflit\_flutter*[[11]](#footnote-11) qu’il suffit d’installer via le gestionnaire de dépendance du framework. Nous avons pu explorer cette solution au travers d’un prototype que nous explorerons dans la section suivante.

Il existe d’autres solutions facilitant l’intégration de modèle de deep learning. Google mettant à disposition au développeur mobile *ML Kit*. Toutefois, cette boîte à outil gargantuesque a été initialement prévue pour développer des solutions directement sur la plateforme mobile dédiée, donc soit Android, soit iOS. En ce qui concerne le cross-platform, Google opte plutôt sur une stratégie d’inférence sur un serveur cloud au travers d’une service Firebase dédié : *Firebase ML.*

Néanmoins, la communauté Flutter met à disposition un plugin permettant son utilisation dans ce framework, rendant ainsi *ML Kit* cross platform. Nous n’avons malheureusement pas exploré cette solution car, bien qu’elle soit maintenue par un publieur vérifié, il ne s’agit pas de Google comme c’est le cas pour le plugin mentionné précédemment, on pourrait donc s’attendre à ce qu’une solution officielle soit supportée plus tard. Le répertoire Github du projet[[12]](#footnote-12) dispose toutefois d’un exemple de classification d’image fonctionnel, et consiste donc en une alternative envisageable en cas de problème rencontré avec l’autre plugin.

### Modélisation et architecture d’un prototype

Nous avons tenté de réaliser une première ébauche comprenant l’ensemble des technologies préférées qui vous ont été présentées jusqu’à maintenant. L’objectif final de notre prototype était de pouvoir réaliser la classification d’une image quelconque à l’aide d’un modèle deep learning depuis une application mobile. Le prototype s’est axé en priorité sur une application fonctionnelle faisant fi des optimisations possibles aux différents niveaux et de l’interface utilisateur. Nous allons détailler les différentes parties dans les sous-sections suivantes ainsi que les problèmes rencontrés et comment ils ont été résolus.

#### Réalisation du modèle

Nous avons donc réalisé cette partie au moyen d’un script Python en utilisant les librairies *TensorFlow* et *Keras*. Plus précisément, nous avons importé un modèle utilisant l’architecture MobileNet V2 que nous avons initialisé avec les poids du dataset ImageNet. Ce faisant, nous n’avons donc pas eu besoin de procéder à un quelconque entrainement.

Nous avons rapidement testé le modèle en fournissant des images pour vérifier que celles-ci étaient correctement prédites. Une contrainte que fourni *Keras* est qu’il est nécessaire de redimensionner l’image fournie pour qu’elle puisse être process par le modèle. En l’occurrence, l’architecture que nous avons utilisée oblige un format de 224 pixels par 224 avec 3 canaux pour les couleurs RGB en entrée.

Le modèle fournit en sortie une probabilité d’appartenance pour les 1000 classes disponibles dans ImageNet. *Keras* fournit les libellés de ces classes. L’exécution du script python nous donnait donc en sortie le nom des classes ainsi que le score de probabilité d’appartenance à ces dernières.

Aucun problème n’a été rencontré pendant cette phase. Les librairies sont très faciles d’accès et il est possible d’obtenir un modèle avec lequel expérimenté rapidement en quelques lignes de codes.

#### Export du modèle

Puisque nous importions le modèle et les poids directement depuis *Keras* nous avons dû le sauvegarder en local au format « SavedModel ». Ce format enregistre un dossier contenant diverses caractéristiques sur le modèle. À noter qu’il n’est pas possible de le sauvegarder directement au format *TensorFlow Lite*, il faut au préalable le sauvegarder en SavedModel ou *.keras,* la documentation officielle recommandant le premier format.

Une fois le modèle sauvegardé, il faut le convertir au format .*tflite*, qui pourra ensuite être exporté sur la plateforme de notre choix. La conversion du fichier est également triviale, mais il est important de noter que les libellés des classes sont perdus lors de ce processus.

Nous avons pu confirmer que la conversion n’altérait pas les résultats du modèle puisque *Keras* met également à disposition l’exécution de modèles importés via de tels fichiers. Les résultats obtenus avec nos images de tests étaient identiques une fois la conversion effectuée.

#### Réalisation de l’application

Nous sommes partis d’un template d’application Flutter vierge. Ce dernier contient simplement un bouton en bas à droite de l’écran incrémentant un compteur qui est affiché au centre. Nous avons simplement retiré l’incrémentation et modifier le comportement du bouton. Celui-ci demande maintenant à l’utilisateur de sélectionner une image de sa galerie. Ceci est réalisé au moyen du package *image\_picker*.

Après inférence du modèle, celui-ci nous retournera une collection sous la forme d’une Map ayant en clé des chaînes de caractères, les libellés de nos classes, et comme valeur des nombres à virgules flottantes, les probabilités d’appartenance. Nous procédons ensuite à une mise en forme des données des telle façon à ce que nous obtenions une liste des données triées de façon descendante sur les valeurs des probabilités, puis nous limitons le nombre de résultats dans la collection à 3. Dis autrement, nous sélectionnons les 3 meilleurs résultats de classification retourné par le modèle.

Hormis quelques méconnaissances du framework nécessitant quelques ajustements çà et là ne méritant pas de mention spéciale, nous avons pu obtenir une interface sommaire et minimaliste nous permettant de manipuler des images en entrée, de les transmettre à un modèle et d’en afficher les résultats.

#### Import et inférence du modèle

Pour utiliser un modèle ainsi que ses libellés via le plugin *tflite\_flutter*, nous devons au préalable les définir comme assets dans notre projet Flutter. Cela consiste à créer un dossier éponyme à la racine du projet, puis d’en indiquer le chemin depuis le fichier *pubsec.yaml* du projet.

Nous devons également fournir en asset un fichier textuel contenant l’ensemble des libellés de chacune de nos classes. Nous avons donc récupéré ce fichier en ligne, chaque classe étant séparée par un retour à la ligne. Le contenu de ce fichier a ensuite été chargé dans une variable sous forme d’une liste de chaînes de caractères.

En ce qui concerne le code pour l’inférence du modèle, nous nous sommes inspirés du code fourni en exemple sur le répertoire Github[[13]](#footnote-13) des développeurs du plugin eux-mêmes. Cet exemple est doté d’une implémentation plus complexe que nécessaire pour notre prototype pour la bonne raison que leur implémentation permet à la fois la classification d’image issue de la galerie de l’utilisateur, mais également de classifier des images live reçue par la caméra de l’utilisateur.

Cette deuxième fonctionnalité oblige l’utilisation de la structure Isolate[[14]](#footnote-14) de Flutter. En effet, sans l’usage de telles structures, l’application subirait des latences importantes puisque la caméra serait figée le temps que l’image soit traitée par le modèle. L’expérience utilisateur s’en verrait affectée.

Pour notre prototype, nous n’avons pas besoin d’utiliser ces structures. Nous avons donc pris soin d’extraire les parties du codes importantes, à savoir celles permettant de récupérer les informations depuis le fichier importé et celles permettant de redimensionner l’images aux bonnes dimensions d’entrée du modèle.

La librairie *tflite\_flutter* permet une grande simplification de l’import du fichier. Il suffit en effet d’instancier un interpréteur en lui fournissant le chemin relatif de l’assets de notre fichier .*tflite*. Ensuite, cet interpréteur dispose de 3 méthodes importantes. Une première permet de récupérer les dimensions du tenseur en entrées qui dans notre cas est [1, 224, 224, 3][[15]](#footnote-15), une deuxième permet de récupérer le tenseur de sortie, à savoir [1, 1000][[16]](#footnote-16). Et finalement une troisième qui exécutera le modèle et qui prends en paramètre une entrée (notre image) et écrit les résultats dans le second, la sortie.

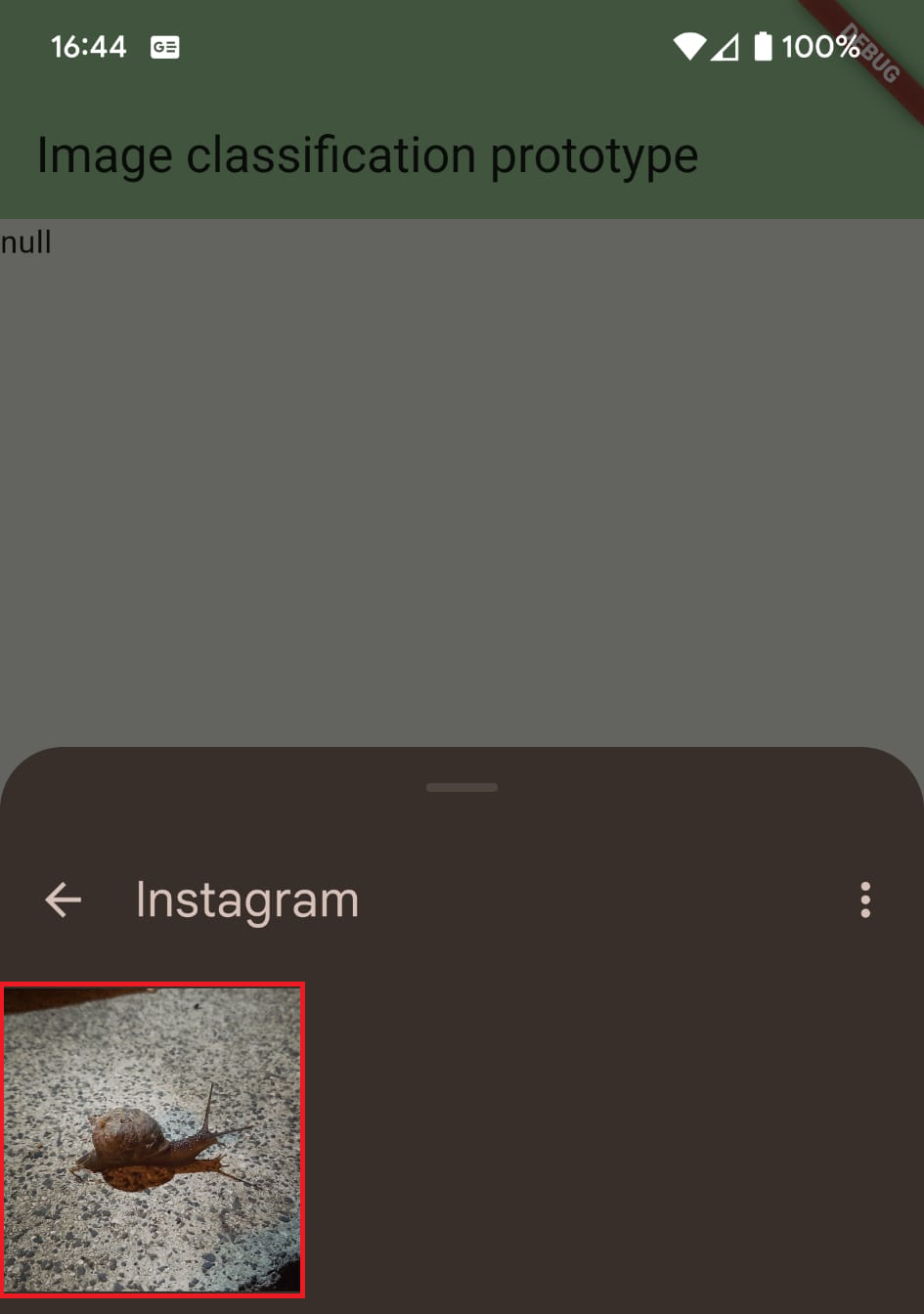
L’étape suivante consiste maintenant à transformer notre image en valeurs numériques et au format du tenseur attendu en entrée. Ici, le package *image* nous a été utile. Il permet de modéliser une image comme étant une collection itérable de pixels et réalise ainsi pour nous la conversion des pixels en valeurs numérique. Avec ce package, nous avons créé en premier temps une copie de l’image d’entrée aux dimensions 224x224. Nous avons ensuite créé une matrice de l’image en parcourant chaque pixel de celle-ci. Nous obtenons ainsi le tenseur d’entrée de notre modèle.

Pour le tenseur de sortie, il suffit de créer une matrice d’une entrée à 1000 valeurs initiées à 0.

Après l’inférence, nous devons encore associer chacune des sorties au bon libellé. La difficulté qui peut résider ici et qu’il est nécessaire de savoir exactement à quoi corresponde chacune des sorties du modèles, mais également de leur ordre, auquel cas les résultats ne seront pas compréhensibles. Une fois l’association entre le libellé et sa valeur de probabilité, il suffit de retourner la collection et de l’afficher dans l’interface.

Ce prototype a été relativement simple à mettre en place, les parties les plus complexes résidant dans le pré-processing de l’image et l’association des résultats à la bonne classe. Nous avons d’ailleurs rencontré un problème d’encodage lors du pré-processing de l’image entre Flutter et Python. En effet, dans Python, la valeur des pixels de l’image en entrée avait été normalisé entre -1 et 1, au contraire du package *image* de Flutter qui a préféré une représentation non normalisée entre 0 et 255. Cette différence nous a causé des confusions, puisque nos premiers tests retournaient des valeurs étonnamment basses (moins de 0.001% de probabilité) et que systématique le top 3 des classes attribuées étaient hors sujet. Par exemple, un chien était alors prédit comme étant un rideau de douche.

Après correction et en normalisant également les données dans le code Flutter, nous obtenions des résultats similaires au script python pour les mêmes images en entrée.



Une image contenant texte, capture d’écran, Police, carte de visite

Description générée automatiquement

Figure 9 – Résultat du prototype Android après inférence d'une image

En sélectionnant une image d’escargot, le prototype donne les 3 classes les plus probables. Ici, on constate que le modèle attribue la classe « escargot » avec une probabilité de 69%.

## Implémentation

### Architecture

Nous inclurons dans l’architecture l’ensemble des éléments qui composent ce projet. Nous identifions ainsi trois éléments principaux reliés entre eux. La **Figure 10** schématise ces trois blocs.

En premier, le script permettant d’obtenir un modèle de classification pour le frelon asiatique, visible par le bloc du haut de la **Figure 10**. Ce script réalisera le pré-traitement des données comme le recadrage, ou l’augmentation de donnée. Puis, il se chargera de la sauvegarde du modèle ainsi que de son export ou format *tflite.*

Afin d’assurer une utilisation large de notre solution à diverses application *Flutter*, nous avons conçu notre solution au sein d’un *Dart package* créer pour l’occasion. En effet, cette méthode permet l’import de notre implémentation au sein de plusieurs applications *Flutter* en ne changeant que les paramètres d’entrées. Précisons que l’appellation *Dart package* fait référence au nom officiel utilisé dans la documentation de *Flutter* et elle n’exclue pas de dépendances avec le framework, ce qui est typiquement notre cas.

De ce fait, le deuxième élément de notre architecture réside en une application de démonstration réalisée avec l’aide de *Flutter,* visible dans le bloc du milieu dans la **Figure 10**. Il s’agit ici d’une simple application graphique permettant l’utilisation de notre *package*. Ici, il s’agira de mettre en évidence les fonctionnalités offertes par notre *package*

Finalement, le troisième élément sera donc un *Dart package* contenant l’ensemble du code nécessaire permettant l’inférence d’une image en lui fournissant en entrée le chemin vers celle-ci, le modèle à utiliser au format *TensorFlow Lite*, et les labels des classes associés. Le bloc final de la **Figure 10** représente ce package.

Une image contenant texte, capture d’écran, logiciel, Système d’exploitation

Description générée automatiquement

Figure 10 - Architecture globale

Chaque rectangle constitue un bloc du projet (de haut en bas : le modèle, l’app démo, le Dart package). L’app démo prendra un fichier tflite contenant le modèle et un fichier texte contenant les labels. Ces derniers en plus de l’image seront fournis au package pour réaliser l’inférence

### Entraînement du modèle

Todo

* Fonction d’activation problématique

### Implémentation de l’application de démonstration

Todo

* Interface simple
* Mise des infos dans assets
* Volonté de mettre en avant la lib avec des boutons

### Implémentation du *Dart Package*

Puisque nous disposions déjà d’un *package[[17]](#footnote-17)* permettant d’inférer une image dans un modèle *TensorFlow Lite*, nous avons orienté le développement de notre *package* comme une surcouche offrant une API haut niveau pour permettre la classification d’image. Par conséquent, cela spécialise le package officiel de *TensorFlow* à une seule tâche, mais facilite son utilisation en y introduisant une abstraction supplémentaire.

#### Contexte

Afin de mieux comprendre notre approche, il est nécessaire de revenir sur le fonctionnement même du *package* initial : *tflite\_flutter.* Son approche, certes fonctionnelle, est assez directe et peut nécessiter un temps de développement additionnel non négligeable. Pour comprendre pourquoi, il suffit de regarder le code d’exemple fournit par la documentation pour l’utilisation de cet outil.

1 final interpreter = await Interpreter.fromAsset('assets/your\_model.tflite');  
2  
3 *// For ex: if input tensor shape [1,5] and type is float32*4 var input = [[1.23, 6.54, 7.81, 3.21, 2.22]];  
5  
6 *// if output tensor shape [1,2] and type is float32*7 var output = List.filled(1 \* 2, 0).reshape([1, 2]);  
8  
9 *// inference*10 interpreter.run(input, output);  
11  
12 *// print the output*13 print(output);

Code 1 - Snippet d'utilisation du package tflite\_flutter

Le défi principal réside à la ligne 4 du **Code 1**. En effet, *tflite\_flutter* part du principe que nous fournissons d’ores et déjà un input formatté correctement, c’est-à-dire une image représentée sous la forme d’une matrice de valeur numérique. Le *package* ne fournit aucune méthode de pré-traitement des données, ce qui implique que le code réalisant ses tâches doit se trouver dans l’application installant cette dépendance, ou dans un autre *package*.

Du reste, il existait déjà un *package* mettant à disposition divers utilitaire permettant de traiter des images afin de pouvoir les fournir à *tflite\_flutter*. Ce dernier se nommait *tflite\_flutter\_helper*, mais est malheureusement annoté *« Discontinued[[18]](#footnote-18) »*, le rendant obsolète sur les dernières versions de *Flutter*. Quant au *Github*[[19]](#footnote-19)du projet, ce dernier n’est plus maintenant depuis plus de 2 ans.

Afin de palier à ce manque, la documentation de *tflite\_flutter* mentionne l’utilisation d’un autre package offrant des fonctionnalité similaires se basant sur le *MediaPipe Solutions* de *Google*. Ce produit est un ensemble de librairies et d’outils simplifiant l’utilisation de l’intelligence artificielle sur diverses plateformes, aussi bien mobiles que sur le web. La promesse étant de permettre l’utilisation de modèle *deep learning* en écrivant un minimum de code.

Bien que cette solution soit documentée sur le site officiel de *MediaPipe*[[20]](#footnote-20) pour *Android* et *iOS*, force est de constater qu’il n’est nullement fait mention d’une solution pour *Flutter* ni même un autre *framework* *cross-platform.* Pire encore, un simple coup d’œil sur le répertoire *Github*[[21]](#footnote-21) dédié à l’implémentation *Flutter* de *MediaPipe*, nous indique que très peu de tâches sont actuellement supportée. La **Figure 11** indique les tâches disponibles au moment de la rédaction de ce travail.

Une image contenant texte, capture d’écran, nombre, Police

Description générée automatiquement

Figure 11 - Liste des tâches supportées par MediaPipe Flutter

Consulté pour la dernière fois en septembre 2024. Nous pouvons constater que seuls les tâches en lien avec le traitement des textes et la génération par IA sont disponibles.

C’est dans ce contexte-ci que nous avons fait le choix de développer nous-même notre *package* utilitaire.

#### Implémentation des interfaces

Pour commencer, l’implémentation d’un *Dart Package* se doit respecter quelques conventions dans l’arborescence de fichier. C’est cette dernière qui permet de déterminer à quelles classes et fonctions le consommateur aura accès. Seuls les fichiers se trouvant dans le répertoire *lib* seront exportés, comme le montre la **Figure 12.**

Une image contenant noir, obscurité

Description générée automatiquement

Figure 12 - Convention d'arborescence pour un Dart package

Dans notre cas, nous avons identifié 3 structures essentielles devant être exposées à nos consommateurs. Tout d’abord, une classe utilitaire disposant de deux méthodes principales, la première permettant l’initialisation des propriétés de ladite classe, puis une seconde réalisant l’inférence du modèle sur une image donnée en paramètre. Cette classe est le point d’interaction entre le consommateur et notre *package*, et devra être initialisé avec le modèle de *deep learning*, le fichier de labels, et les options d’inférence.

La seconde structure sera une classe façade qui englobe plusieurs paramètres permettant de définir les préférences d’exécutions du modèle, comme le nombre de threads alloués ou encore si le modèle doit préférer l’utilisation d’un processeur graphique. Ces options sont celles fournies pas le *package* *tflite\_flutter*, nous devons donc permettre leur accès sans obliger nos consommateurs de dépendre directement de ce *package*-ci. La création d’une classe pour englober ces options nous a semblé pertinente puisque ces paramètres sont essentiellement un ensemble de type primitif, et les combiner dans un seul élément offre une meilleure lecture et utilisation lorsqu’ils doivent être passer en paramètre d’une autre fonction.

La troisième structure repose simplement sur une énumération de différentes méthodes de normalisation des valeurs des pixels d’une image. Les options que nous avons décidé de traiter sont en lien avec les fonctions d’activations courantes utilisées dans les modèles de classification d’image, comme la sigmoïde ou la tangente hyperbolique. Elles normalisent respectivement les valeurs entre 0 et 1 ou -1 et 1. Nous avons également permis de ne pas normaliser les données, ce qui peut être utile dans le cas de modèles quantifiés ou les calculs s’effectuent avec des nombres entiers. La création de cette énumération découle d’un obstacle rencontré lors du prototypage de notre solution dans le chapitre précédent. En effet, le modèle *MobileNet* pré-entrainé avec *ImageNet* disposait de valeurs normalisées entre 0 et 1, mais notre prototype ne procédait à aucune normalisation, si bien que le résultat en sortie du modèle n’était pas du tout interprétable par notre application. En normalisant les pixels de l’image en entrée, nous avions ainsi pu obtenir le résultat attendu.

À ce stade de nos explications, nous disposons donc d’une structure comme décrite par la **Figure 13.**

Une image contenant texte, capture d’écran, diagramme, Parallèle

Description générée automatiquement

Figure 13 - Diagramme de classe de la partie exposée du Dart package

Les getters et setters ne sont pas représentés dans ce diagramme. Ci-dessus est figuré l’ensemble des structures dans le dossier lib. Ceci constitue l’ensemble des éléments accessible depuis les apps consommatrices

La classe *ImageClassificationHelper* dans la **Figure 13** dispose de deux propriétés de type *Tensor* et une autre de type *Interpreter*. Les deux premières définissent une structure englobante permettant les interactions avec l’API de *TensorFlow,* la deuxième représente le modèle de réseau de neurones. Il s’agit de types fournis avec le package *tflite\_flutter* représenté à droite sur la figure. La méthode *\_loadOptions* retourne un type *InterpreterOptions* qui est une structure également disponible dans *tflite\_flutter*. Elle dispose de diverses options configurables paramétrant l’inférence du modèle, comme le nombre de thread et l’utilisation d’un processeur graphique. Ainsi, notre classe *ImageClassificationOption* est la façade de *InterpreterOptions,* comme nous l’avions évoqué plus tôt.

Pour faciliter l’initialisation de la classe *ImageClassificationHelper*, nous fournissons la méthode *initHelper* qui prendra en paramètre les chemins du modèle et du fichier de label. Pour ces derniers, il pourra être fourni un caractère de séparation indiquant au *package* comment chaque classe est séparée dans le fichier, la séparation par défaut étant le retour à la ligne (\n). Si le consommateur le désire, il pourra fournir les options souhaitée pour l’inférence.

Si nous nous attardons un peu plus sur la classe *ImageClassificationOption*, voici un descriptif des différents paramètres :

* ***numThreads*:** Définit le nombre de threads alloué pour l’inférence du modèle. Par défaut, seul un thread est alloué.
* ***useGpu*:** Ce booléen permet de déterminer à quel unité de calcul l’inférence sera déléguée. Si ce dernier est défini à *true*, alors l’inférence sera exécutée sur le processeur graphique. Par défaut sa valeur est *false*.
* ***useXnnPack*:** Permet l’utilisation de *XNN Pack*, une solution permettant d’optimiser l’inférence des modèles utilisant des virgules flottantes sur diverses architecture de processeur. La **Figure 14** met en évidence les performances obtenues pour l’inférence des modèles MobileNet sur smartphones Android. Par défaut, sa valeur est à *false*.
* ***normalizeMethod*:** Définit comment les valeurs numériques de chaque pixel de l’image seront normalisées en entrée du modèle. Par défaut, aucune normalisation n’est appliquée.
* ***isBinary*:** Définit si le modèle doit être interprété comme une classification binaire à une seule sortie. La valeur par défaut est *false*.
* ***binaryThreshold*:** Définit la valeur seuil à laquelle bascule la classification binaire sur la première ou deuxième classe. Si la prédiction est inférieur au seuil, la première classe lui sera attribuée. Dans le cas contraire, c’est la deuxième classe qui est attribuée. Par défaut, le seuil est fixé à 0.5. Cette valeur est ignorée si *isBinary* est *false*.

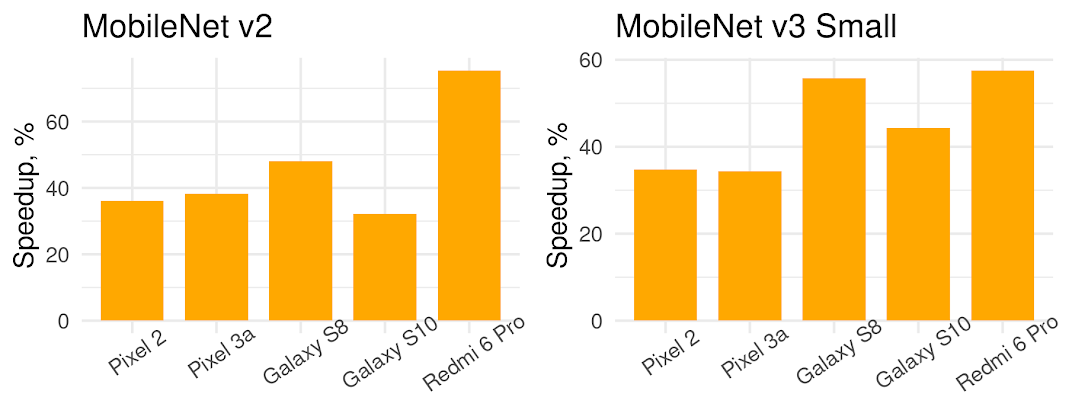


Figure 14 - Gain de rapidité d'inférence supposé avec XNN Pack[[22]](#footnote-22)

Le blog post dont est issu la figure ci-dessus ne fait pas mention des tests réalisés permettant d’obtenir ces résultats, ni ne mentionne le temps d’inférence initial. Ces chiffres sont donc à titre indicatif et n’ont pas de réelles valeurs scientifiques.

Une fois le modèle, les labels et les options chargées, le consommateur pourra appeler la méthode *inferenceImage* à laquelle sera fourni un chemin vers l’image à traiter. Nous avons préféré l’envoi d’un chemin plutôt que d’un fichier pour déléguer la responsabilité d’interprétation du format de fichier au *package*. Cela simplifie l’utilisation pour le consommateur et l’allège de potentielle dépendance utilisée par notre *package*.

Avant d’être envoyé au modèle, l’image sera donc reconstruite depuis le chemin fourni. Ici, nous introduisons l’utilisation d’une autre dépendance au *package image*[[23]](#footnote-23). Ce dernier permet d’ajouter un niveau d’abstraction supplémentaire à un fichier en facilitant l’accès aux propriétés des images tel que la hauteur et la largeur et aussi des valeurs RGB de chaque pixel. Cette abstraction simplifie la manipulation de l’image, notamment dans le processus de normalisation des valeurs que nous aborderons dans la prochaine sous-section.

#### Implémentation des fonctions internes

Les éléments mentionnés jusqu’à présent constituent donc les différentes interfaces qu’une application *Flutter* pourra utiliser pour interagir avec notre *package*. Nous allons maintenant approfondir l’implémentation du code qui n’est pas exposé aux consommateurs.

L’aspect principal que nous avons gardé en tête pendant la réalisation de ce package, est qu’un modèle de réseau de neurone nécessite un temps d’exécution qui est mesurable. Sans savoir à l’avance la durée exacte de l’inférence, nous devions proposer une solution ne bloquant pas le thread principal de l’application.

En *Dart*, il y a deux concepts clés à comprendre pour comprendre l’ordre d’exécution des évènements et la concurrence. ***L’event loop*** et les ***Isolates***. Le premier se définit comme une file d’attente d’évènement devant être traiter par le programme, tels que le rafraîchissement de l’interface graphique, ou la gestion de pression d’un bouton. Chaque évènement est traité dans l’ordre qu’il a été inséré dans la file, et ils sont tous traité les uns après les autres, si bien qu’un évènement long à traiter donnera l’impression que notre application ne répond plus aux interactions.

Une première façon de manipuler

## Axes d’amélioration

### Modèle de classification du frelon asiatique

#### Dataset du frelon asiatique

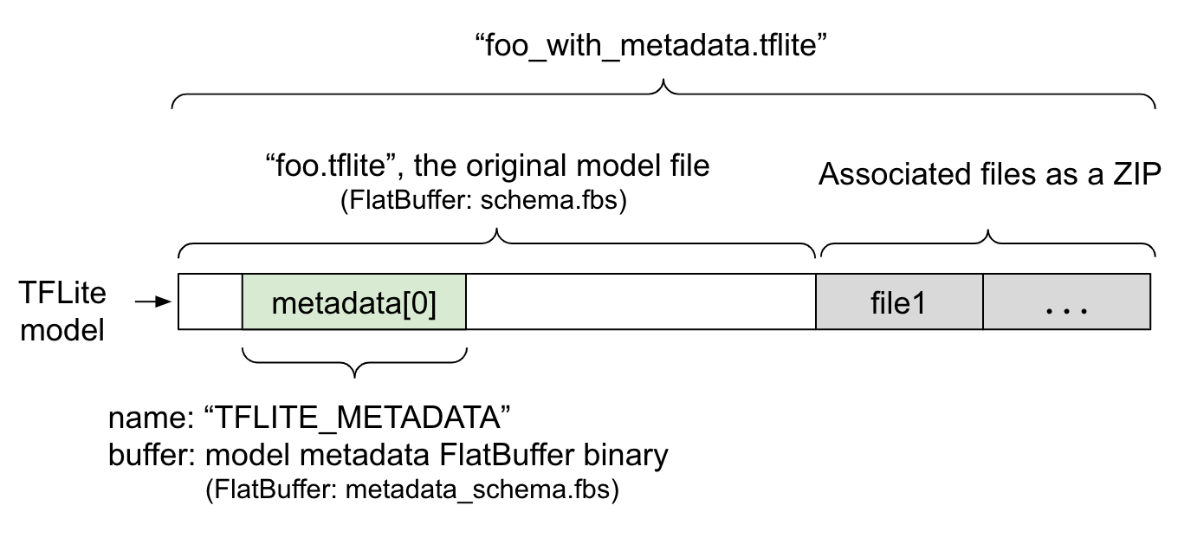
### *Dart Package* pour la classification d’images

#### Interprétation des headers du fichier tflite

Nous avons forcé les consommateurs de la lib à fournir un fichiers supplémentaire contenant les différents labels des classes de leurs modèles. Toutefois, *TensorFlow Lite* offre la possibilité de lier des fichiers directement au fichier *tflite*. Par la suite, nous aurions pu accéder à ce fichier et en extraire les informations souhaitées. La **Figure TODO** schématise l’encodage du format *tflite*.

Les fonctionnalités proposées ne s’arrêtent pas là, et il est possible de fournir un ensemble de métadonnées au fichier *tflite*, notamment des informations sur les entrées et sorties du modèles, les ensembles de valeurs supportées, les types numériques traités, le spectre d’encodage des couleurs de l’image, etc…

Nous n’avions pas eu besoin d’informations complémentaires autres que les formats des entrées et sorties du modèle. L’utilisation des labels en format séparé nous a permis d’expérimenté avec les librairies de *Flutter* sans avoir besoin de recompilé le modèle au format *tflite*. D’où notre choix de ne pas approfondir cette piste.



TODO : https://ai.google.dev/edge/litert/models/metadata#pack\_the\_associated\_files

## Conclusion

Cliquez ou appuyez ici pour entrer du texte.

# Bibliographie

Bhatt, D., Patel, C., Talsania, H., Patel, J., Vaghela, R., Pandya, S., . . . Ghayvat, H. (2021). *CNN Variants for Computer Vision: History, Architecture, Application, Challenges and Future Scope.* Récupéré sur MDPI: https://www.mdpi.com/2079-9292/10/20/2470

Gillis, A. S. (2023, Septembre). *transfer learning.* Récupéré sur TechTarget: https://www.techtarget.com/searchcio/definition/transfer-learning

Lapuschkin, S., Wäldchen, S., Binder, A., Montavon, G., Samek, W., & Müller, K.-R. (2019, Mars 11). Unmasking Clever Hans predictors and assessing what machines really learn. *Nature Communications*, p. 10.

Mrinal, W. (2022, Septembre 28). *Object Detection vs. Image Classification vs. Keypoint Detection*. Récupéré sur Roboflow Blog: https://blog.roboflow.com/object-detection-vs-image-classification-vs-keypoint-detection/

Rasyad, M. A., Dewanta, F., & Astuti, S. (2021). *All-in-one computation vs. computational-offloading approaches: a performance evaluation of object detection strategies on android mobile devices.* Récupéré sur ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/358725019\_All-in-one\_computation\_vs\_computational-offloading\_approaches\_a\_performance\_evaluation\_of\_object\_detection\_strategies\_on\_android\_mobile\_devices

Wikipedia. (s.d.). *Wikipedia*. Consulté le Juillet 2, 2024, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage\_profond

# Annexes

**Index**

Adobe Illustrator, 1

Inkscape, 1

1. *Convolutional neural networks* [↑](#footnote-ref-1)
2. https://universe.roboflow.com/ [↑](#footnote-ref-2)
3. Accessible ici : https://universe.roboflow.com/use-case-asian-hornet-detection/asian-hornet-detection-a6ael/dataset/2 [↑](#footnote-ref-3)
4. Accessible ici : https://universe.roboflow.com/cyp-puhyr/asian-hornet-2/dataset/1 [↑](#footnote-ref-4)
5. Dataset de 1000 classes d’objets différents, animaux, véhicules, outils, mobilier, etc… [↑](#footnote-ref-5)
6. https://onnxruntime.ai/docs/get-started/with-javascript/react-native.html [↑](#footnote-ref-6)
7. https://reactnative.dev/docs/native-modules-intro [↑](#footnote-ref-7)
8. https://reactnative.dev/docs/the-new-architecture/landing-page [↑](#footnote-ref-8)
9. https://github.com/reactwg/react-native-new-architecture/blob/main/docs/turbo-modules.md [↑](#footnote-ref-9)
10. https://github.com/reactwg/react-native-new-architecture/blob/main/docs/fabric-native-components.md [↑](#footnote-ref-10)
11. https://pub.dev/packages/tflite\_flutter [↑](#footnote-ref-11)
12. https://github.com/flutter-ml/google\_ml\_kit\_flutter [↑](#footnote-ref-12)
13. https://github.com/tensorflow/flutter-tflite/tree/main/example/image\_classification\_mobilenet [↑](#footnote-ref-13)
14. Sorte de mini-thread équivalent au coroutine dans Android [↑](#footnote-ref-14)
15. Respectivement : [Taille du batch, Largeur, Hauteur, canaux de couleurs (RGB)] [↑](#footnote-ref-15)
16. Respectivement : [Taille du batch, Nombre de sorties] [↑](#footnote-ref-16)
17. Lien pub.dev de *tflite\_flutter* : https://pub.dev/packages/tflite\_flutter [↑](#footnote-ref-17)
18. Lien pub.dev du package : https://pub.dev/packages/tflite\_flutter\_helper [↑](#footnote-ref-18)
19. Lien du Github de *tflite\_flutter\_helper*: https://github.com/am15h/tflite\_flutter\_helper [↑](#footnote-ref-19)
20. Lien vers *MediaPipe Solutions*: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide [↑](#footnote-ref-20)
21. Lien du Github de *flutter\_mediapipe*: https://github.com/google/flutter-mediapipe [↑](#footnote-ref-21)
22. TODO : déplacer dans la bibliographie => https://blog.tensorflow.org/2020/07/accelerating-tensorflow-lite-xnnpack-integration.html [↑](#footnote-ref-22)
23. Lien vers le *package image*: https://pub.dev/packages/image [↑](#footnote-ref-23)