

**Classification d’images avec MobileViTv2**

**Note méthodologique & preuve de concept**

Sommaire

[Dataset retenu 2](#_Toc203731654)

[Les concepts de l’algorithme récent 2](#_Toc203731655)

[Rappels sur le benchmark : ResNet50 2](#_Toc203731656)

[L’algorithme récent : MobileViTv2 4](#_Toc203731657)

[La modélisation 9](#_Toc203731658)

[Synthèse des résultats 10](#_Toc203731659)

[Rappels des résultats obtenus avec ResNet50 10](#_Toc203731660)

[Résultats obtenus avec MobileViTv2 12](#_Toc203731661)

[Feature importance 13](#_Toc203731662)

[Feature importance globale 13](#_Toc203731663)

[Feature importance locale 13](#_Toc203731664)

[Limites & améliorations possibles 14](#_Toc203731665)

[Références bibliographiques 15](#_Toc203731666)

# Dataset retenu

Le jeu de données retenu est composé de 1,050 images non augmentées issues du Projet 6 – Classifiez Automatiquement des Biens de Consommation, et réparties en 3 sous-jeux d’entraînement (700 images), de validation et de test (175 images chacun).

Ce jeu d’images est celui sur lequel le meilleur résultat avait été obtenu dans le cadre de ce précédent projet pour la classification supervisée avec transfer learning sur les images seules (sans l’intégration des features issues de l’analyse de texte également disponibles) avec le modèle ResNet50; ces résultats s’étaient cependant avérés tout à fait modestes et inhomogènes dans leur capacite de prédiction des classes (voir rappel des résultats du modèle ResNet50 ci-dessous). Ce jeu de données offre donc une problématique intéressante, particulièrement en raison de sa taille très modeste (<1000 images), et il conviendra donc d’étudier si des perspectives d’amélioration significatives de la classification automatique de ces images existent avec l’emploi de techniques de modélisation plus récentes.

Le jeu d’images retenu présente une répartition équilibrée dans les 7 catégories suivantes :

|  |  |
| --- | --- |
| **Product Category** | **Label** |
| Baby Care | 0 |
| Beauty and Personale Care | 1 |
| Computers | 2 |
| Home Décor & Festive Needs | 3 |
| Home Furnishing | 4 |
| Kitchen & Dining | 5 |
| Watches | 6 |

A pie chart with numbers and a graph

AI-generated content may be incorrect.

# Les concepts de l’algorithme récent

## Rappels sur le benchmark : ResNet50

À sa publication en 2016 par plusieurs chercheurs de l’équipe de Microsoft Research Asia, l’architecture ResNet a révolutionné l’optimisation de l’apprentissage et des performances des réseaux de neurones convolutifs (CNN) très profonds en apportant une solution innovante à la dégradation des performances causée par le problème du *vanishing gradient*. En introduisant les blocs résiduels et les connexions de saut en plus des couches convolutives[[1]](#footnote-1) classiques, ResNet a permis l’entraînement de modèles beaucoup plus profonds, dont le plus communément utilisé est la version à 50 couches, et a ouvert la voie à des architectures à 101, voire 152 couches, sans dégradation notable de la performance[[2]](#footnote-2) sur des tâches complexes (classification, détection, segmentation). Cette architecture novatrice présentait également l’avantage de permettre une réduction computationnelle qui a permis son application à d’autres jeux de données et tâches par rapport aux architectures « classiques » de l’époque comme VGG.

A diagram of a diagram

AI-generated content may be incorrect.

**Bloc résiduel avec connexion de saut**

**Source : https://paperswithcode.com/method/residual-block[[3]](#footnote-3)**

Chaque bloc de ResNet50 apprend non pas une fonction directe de transformation, comme c’est le cas d’une couche de convolution classique, mais le résidu entre l’entrée et la sortie visée. Ces sauts (« skip connections ») permettent au gradient (et donc à l’information d’apprentissage) de traverser directement plusieurs couches intermédiaires lors de la rétropropagation, grâce à un « pont » entre l’entrée et la sortie du bloc qui conserve l’information.

A diagram of a machine

AI-generated content may be incorrect.

**Block résiduel inversé « bottleneck »**

**https://paperswithcode.com/method/bottleneck-residual-block**

Malgré sa puissance, ResNet50 nécessite une utilisation fine de la régularisation et de l’augmentation de données pour éviter les problèmes de sur-apprentissage sur de petits jeux de données[[4]](#footnote-4).

La combinaison résidu/connexion de saut introduite par ResNet a marqué un tournant dans l’évolution du deep learning appliqué aux images, et elle est désormais standard pour la plupart des architectures CNN ; elle a également inspiré les transformers, que les nouvelles générations de modèles comme MobileViT utilisent.

## L’algorithme récent : MobileViTv2

Initialement développé par Apple en s’appuyant sur l’architecture MobileNet développée par Google et publié en 2022, le modèle MobileViTv2 est une architecture hybride optimisée pour les appareils mobiles et embarqués qui repose sur la combinaison de blocs transformeurs légers (les blocs MobileViT) et qui permet modéliser les relations globales, à « longue distance » dans l’image, tout en capturant également les caractéristiques locales de l’image avec des convolutions séparables en profondeur.

Alors que dans ResNet50, l’utilisation des couches de convolution seules visait à extraire des motifs visuels pertinents hiérarchiquement, à différents niveaux de profondeur[[5]](#footnote-5) (les premières couches détectent des bords et des textures, tandis que les couches profondes capturent des objets ou des concepts plus abstraits), dans MobileViTv2, leur combinaison avec des blocs transformeurs  permet d’y ajouter une modélisation globale de l’image en identifiant les régions de l’image les plus influentes pour la classification finale, même si celles-ci sont éloignées spatialement dans l’image.

MobileViTv2 élabore et raffine également le concept des visual Transformers (ou « ViT »), architectures traditionnellement coûteuses en calcul, en substituant une attention séparable (« separable self- attention ») à l’attention multi-tête (« multi-head self-attention ») utilisée jusque-là dans les ViT, ce qui permet, outre une meilleure propagation de l’information, une accélération remarquable des temps de traitement[[6]](#footnote-6) qui rend cette famille de modèles particulièrement efficiente pour l’inférence en temps réel sur des appareils à ressources limitées (tels que les téléphones mobiles) ou sur des données bruitées (telles que des images satellite[[7]](#footnote-7)) ; cette accélération des temps d’inférence est atteinte avec des performances égales ou supérieures à celles des CNN purs comme ResNet50, et confère à ces modèles une excellente capacité de généralisation même sur des jeux d’entraînement de taille limitée. Enfin, dans l’architecture MonbileViTv2 les activations non-linéaires après les couches fines ont également été supprimées au profit d’activations linéaires, contribuant encore davantage à l’efficience accrue de cette architecture par rapport à la « première génération » de ViTs[[8]](#footnote-8).

A diagram of a block diagram

AI-generated content may be incorrect.

**Visual transformers et MobileViT blocks de « première génération »[[9]](#footnote-9)**

A diagram of a computer program

AI-generated content may be incorrect.

**Comparaison de l’architecture des blocs dans Mobile ViTv1 et MobileViTv2**

**On note dans MobileViTv2 la disparition du fusion block, contribution majeure à l’efficience accrue du modèle.**

**From** [**https://arxiv.org/pdf/2209.15159**](https://arxiv.org/pdf/2209.15159)

**6.**

A diagram of a flowchart

AI-generated content may be incorrect.

**1. 2. 3. 4. 5. 7. 8. 9.**

**Bloc MobileViTv2[[10]](#footnote-10)**

Le bloc MobileViTv2 affine le principe du bloc MobileViT en combinant modélisation locale (convolutions) et globale (attention séparable) selon les étapes suivantes :

1. **Entrée X :** L’image ou la carte de caractéristiques (features) d’entrée est transmise au bloc ;
2. **Convolution séparée en profondeur:** utilise un noyau de taille 3×3 pour encoder les représentations locales et apprendre séparément des motifs dans chaque canal, ce qui extrait efficacement des caractéristiques locales avec peu de paramètres ;
3. **Convolution ponctuelle:** utilise un noyau de taille 1×1 et mélange l’information entre canaux, tout en maintenant l’efficacité paramétrique ;
4. **Dépliage:** Les cartes de caractéristiques sont découpées en k patchs plats (sous-blocs), rendant le flux compatible avec le traitement de type transformer en utilisant une hauteur et une largeur de patch de deux ;
5. **Blocs transformeurs “light” :** Chaque patch passe à travers une auto-attention séparable (beaucoup plus légère que l’attention multi-tête classique, complexité linéaire O(k)), pour apprendre les dépendances globales entre patches, et un réseau feed-forward pour transformer davantage les représentations. Cette combinaison est répétée B fois[[11]](#footnote-11) dans chaque bloc, selon la configuration du modèle ;
6. **Sauts résiduels :** Après chaque sous-bloc attention/feed-forward, un ajout résiduel (“skip connection”) permet un apprentissage stable, même en profondeur ;
7. **Repliage (Fold):** Les patches transformés sont réassemblés (“repliés”) pour reconstituer la carte de caractéristiques globale, préservant la structure spatiale. Tout comme le dépliage, le repliage utilise une hauteur et une largeur de patch de deux ;
8. **Convolution ponctuelle :** utilise un noyau de taille 1×1 et mélange à nouveau l’information entre canaux, ce qui prépare la carte pour les blocs suivants ou la sortie du réseau ;
9. **Sortie y**

Grâce à l’attention, les transformers peuvent détecter les caractéristiques sémantiquement pertinentes d’une image, agréger des informations locales et globales et s’adapter à de grandes images complexes sans perdre la capacité à se focaliser sur les détails clés. La self-attention « standard »[[12]](#footnote-12) des transformers (dite aussi « multi-tête »), telle qu’utilisée par MobileViT est efficace mais coûteuse en calculs, particulièrement pour du matériel mobile. La self-attention séparée introduite par MobileViTv2 rend le calcul de l’attention beaucoup plus efficace.



**1.**

**2.**

**3.**

**4.**

**5.**

A diagram of a graph

AI-generated content may be incorrect. A diagram of a graph

AI-generated content may be incorrect.

Attention multi-tête - MobileViT Attention separable - MobileViTv2[[13]](#footnote-13)

Le schéma de gauche représente l’auto-attention multi-tête standard utilisée dans les transformers, et dont la complexité algoruthmique est O(k²)[[14]](#footnote-14). Le schéma de droite correspond à la couche d’auto-attention séparable des transformeurs visuels de seconde génération, qui présente une complexité linéaire, c’est-à-dire O(k), et utilise des opérations élémentaires, notamment par la suppression des multiplications de matrices par lots, ce qui permet une inférence beaucoup plus rapide[[15]](#footnote-15).

Ce mécanisme de l’attention s’articule autour des étapes suivantes :

1. **Encodage de l’entrée :** L’image est généralement découpée en patchs (petits carreaux ou tokens) et convertie en vecteurs.
2. **Vecteurs Query, Key, Value :** Le vecteur de chaque patch est projeté sous trois formes séparées : **Query (Q)**, **Key (K)** et **Value (V)**.
3. **Calcul de similarité :** Le modèle calcule des scores d’attention en mesurant la correspondance entre la Query d’un patch et les Keys de tous les autres (produit scalaire). Cela détermine à quel point un patch doit “prêter attention” aux autres.
4. **Poids d’attention :** Les scores sont normalisés (softmax), devenant des poids d’attention qui indiquent l’importance de chaque patch, avec :

**A math equation with a white background

AI-generated content may be incorrect.**

où dk est la dimension des vecteurs Key.

1. **Agrégation contextuelle :** La sortie de chaque patch est une somme pondérée de tous les vecteurs Value, les poids reflétant les relations pertinentes.

Plutôt que de calculer une carte d’attention globale via des multiplications de matrices coûteuses, MobileViTv2 réalise des opérations élémentaires par patch permettant de garder le focus “global” ; cette architecture novatrice permet des performances élevées en classification d’image tout en limitant la complexité et le coût computationnel du modèle, et elle a été comparée de façon répétée dans la littérature scientifique à ResNet50, notamment du point de vue de sa précision en classification[[16]](#footnote-16), qu’elle égale ou dépasse tout en requérant des ressources de calcul significativement moindres.

**Synthèse de la comparaison :**

| **Modèle** | **Précision (Imagnet)** | **Taille du modèle** | **Complexité de l’attention** | **Latence** | **Robustesse** | **Usage mémoire** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ResNet50 | Bonne à très bonne | Large | Inexistante (CNN pur) | Moyenne à haute | Sensible à l’over fit | Élevé |
| MobileViTv2 | Très bonne | Compact | Séparable, linéaire O(k) | Faible | Excellente sur petit datasheet | Très faible |

La littérature scientifique récente présentant MobileViTv2 comme une alternative moderne et efficiente à ResNet50, les performances des deux modèles ont donc été comparées sur le dataset retenu.

# La modélisation

Afin d’assurer des résultats robustes, le jeu de données a été séparé en 3 sous-jeux d’entraînement (700 images), de validation et de test (175 images chacun).

Le contrôle de l’overfitting est assuré par un entraînement sur 50 epochs avec un critère d’early stopping associé à une patience de 5 epochs.

Afin d’assurer la comparabilité des résultats avec ceux obtenus avec ResNet50, aucune transformation (hors la normalisation et le resizing) ni augmentation n’ont été appliquées sur les images, le meilleur résultat ayant été obtenu avec ResNet50 sur les images originales non-augmentées.

La métrique principale retenue pour comparer les modèles est le F1-score (score F1 macro), qui combine précision et rappel en une seule valeur synthétique. Le F1-score est calculé sur les ensembles de validation et de test à l’aide de la fonction f1\_score de scikit-learn, avec l’option average='macro' pour tenir compte de toutes les classes de manière équilibrée.

Le score F1 est la moyenne harmonique de la précision et du rappel :

A close-up of words

AI-generated content may be incorrect.

où :

A math equations with black text

AI-generated content may be incorrect.A close up of words

AI-generated content may be incorrect.

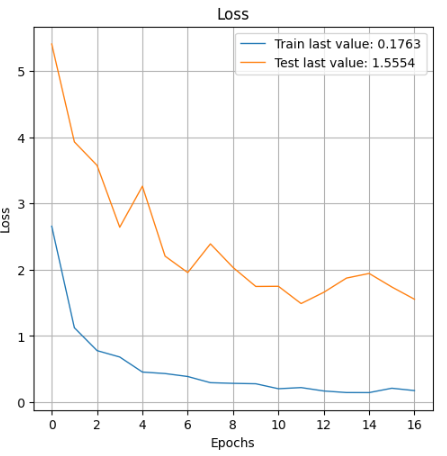
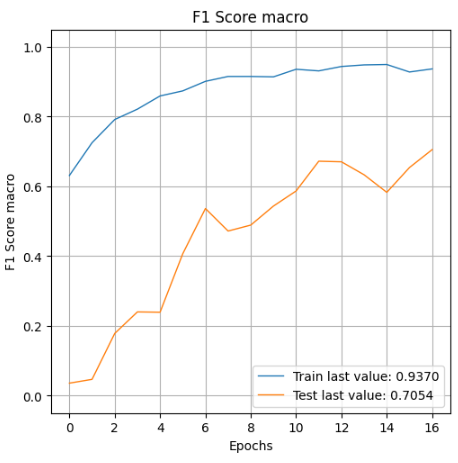
Le score F1 varie de 0 (le pire) à 1 (le meilleur) et un score élevé indique que le modèle a à la fois une haute précision et un haut rappel ; le score F1 fournit donc une métrique synthétique qui équilibre le compromis entre la précision et le rappel, ce qui en fait un choix courant pour l’évaluation des performances d’un modèle de classification multi-classes.

Le fit time a également été considéré dans l’évaluation, ainsi que la capacite du modèle à prédire spécifiquement chaque classe, qui a été représentée dans une matrice de confusion.

La fonction de perte utilisée est la 'categorical\_crossentropy', adaptée aux problèmes de classification multi-classes, et qui mesure la différence entre la distribution de probabilités prédite par le modèle et la distribution connue ; plus la valeur est faible, plus la prédiction réalisée par le modèle est proche des « vrais labels » des classes.

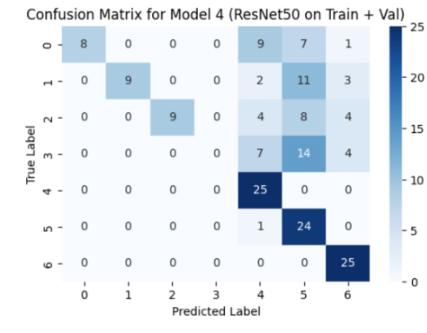
# Synthèse des résultats

## Rappels des résultats obtenus avec ResNet50

**Fit time :** 101.34 secondes

L’analyse de la fonction de perte montre qu’un plateau est atteint relativement rapidement sur le jeu d’entraînement, indiquant que le modèle « cesse d’apprendre ». Même si la fonction de perte sur le jeu de validation montre une tendance généralement décroissante, ses performances sont inégales selon les epochs, et l’écart entre les courbes d’entraînement et de validation ne se réduit pas de façon significative, restant relativement important. La capacité de généralisation du modèle s’en trouve affectée ; il est probable ici que la petite taille du jeu d’entraînement contribue au surapprentissage observé. Le score F1 montre quant à lui une amélioration irrégulière, et un écart relativement marqué entre les scores d’entraînement et de validation.



La matrice de confusion sur le jeu de test met en évidence des performances très inégales du modèle selon les classes :

* Les classes 4 (Home Furnishing) et 6 (Watches) sont parfaitement prédites ;
* La classe 5 (Kitchen & Dining) est également très bien prédite ;
* Les classes 0 (Baby Care), 1 (Beauty & Personal Care) et 2 sont très mal prédites (environ 30% de prédictions correctes), étant généralement confondues avec les classes 4 à 6 …
* …de même que la classe 3 (Home Decor & Festive Needs), qui elle n’est en outre jamais correctement prédite.

## Résultats obtenus avec MobileViTv2

A graph of a graph

AI-generated content may be incorrect.A graph with blue and orange lines

AI-generated content may be incorrect.

**Fit time :** 23.13 secondes

Les courbes d’entraînement et de validation ne montrent pas de surapprentissage marqué pour MobileViTv2 ; les deux courbes diminuent progressivement avec le nombre d’epochs et la courbe de validation est relativement proche de celle d’entraînement, suggérant une bonne capacite de généralisation des résultats du modèle.

A graph of a graph

AI-generated content may be incorrect.

La matrice de confusion sur le jeu de test met en évidence des prédictions d’une qualité beaucoup plus homogène, toutes les classes étant prédites correctement au moins 2 fois sur 3. La classe 0 (Baby Care) est la moins bien prédite ici ; la mieux (et parfaitement) prédite est la classe 5 (Kitchen & Dining).

MobileViTv2 a donc surpassé ResNet50 en termes de F1-score sur les ensembles de validation et de test, tout en nécessitant un temps d’entraînement divisé par 4. Ces observations sont cohérentes avec la littérature scientifique, MobileViTv2 offrant un compromis optimal entre performance et efficacité sur les jeux d’entraînement de taille restreinte.

# Feature importance

## Feature importance globale

L’étude de la feature importance globale sur les modèles de classification d’images offre peu de données interprétables, étant attribuée au niveau de l’unité de représentation qu’est le pixel.

A graph of different colored squares

AI-generated content may be incorrect.

L’exemple ci-contre pris sur les 20 premier pixels montre par exemple que les pixels en seconde et quatrième a sixième positions sont clairement attribues à la classe 3, alors que le pixel en avant dernière position est attribué à la classe 4.

C’est donc un outil peu informatif ici en l’absence de mapping des pixels aux images auxquelles ils appartiennent.

## Feature importance locale

L’étude d’un exemple de feature importance locale fournit des informations plus facilement exploitables pour la compréhension des résultats. En reprenant l’exemple de l’image f4d4c2eec77732f56e47722d7a355f2b.jpg qui appartient à la classe 3 (Home Decor & Festive Needs) et qui a été correctement prédite par le modèle, il est possible de visualiser les zones critiques pour la prédiction :

A gold statue of a buddha sitting in a lotus pose

AI-generated content may be incorrect.A screenshot of a cell phone

AI-generated content may be incorrect.A colorful statue of a buddha

AI-generated content may be incorrect.

A close up of a number

AI-generated content may be incorrect.

**Image originelle** **Feature importance locale Feature importance locale**

**avec SHAP avec GradCAM**

Cet exemple met clairement en évidence les zones de l’image les plus déterminantes pour sa classification telles qu’activées par le modèle.

L’utilisation de GradCAM[[17]](#footnote-17) offre ici une granularité supérieure à SHAP, qui ameliore l’auditabilite et la transparence des resultats du modele.

# Limites & améliorations possibles

* **Augmentation des données :** enrichir les jeux de données par des techniques avancées d’augmentation pour améliorer la robustesse du modèle peut offrir des perspectives d’amélioration supplémentaires de la qualité des prédictions ;
* **Augmentation de la taille du dataset:** Le défi principal ici est la taille très modeste du jeu d’entraînement (<1000 images). Un enrichissement du dataset par l’intégration d’articles et d’images supplémentaires dans chaque catégorie s’impose, particulièrement sur les catégories 0 à 3 qui étaient le moins bien identifiées par les CNN « purs » comme ResNet50 ;
* **Inclusion d’un critère métier:** à l’heure actuelle, les images sont classifiées manuellement par les équipes de Place de Marché et le pourcentage d’erreur humaine dans ce processus est inconnu. Avant toute décision d'implémentation de ces modèles en production, qui sera par nature chronophage et coûteuse, il est impératif d’intégrer cette donnée métier pour déterminer le coût d’opportunité du statu quo, afin d'établir si l’utilisation d’une classification automatique permet une réduction effective du taux d’erreur de classification et du coût de main-d’œuvre nécessaire, parmi d’autres facteurs à intégrer.

# Références bibliographiques

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). *An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale* (arXiv:2010.11929). Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). <https://arxiv.org/abs/2010.11929>

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). *Deep residual learning for image recognition* (arXiv:1512.03385). Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770–778. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385>

Hugging Face. (n.d.). *MobileViTV2*. Hugging Face Transformers documentation. <https://huggingface.co/docs/transformers/en/model_doc/mobilevitv2>

Le, T.-D., Ha, V. N., Nguyen, T. T., Eappen, G., Thiruvasagam, P., Garces-Socarras, L. M., Chou, H.-F., Gonzalez-Rios, J. L., Merlano-Duncan, J. C., & Chatzinotas, S. (2024). *On-board satellite image classification for Earth observation: A comparative study of pre-trained Vision-Transformer models*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2409.03901>

Mehta, S., & Rastegari, M. (2021). *MobileViT: Light-weight, general-purpose, and mobile-friendly vision transformer* (arXiv:2110.02178). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2110.02178>

Mehta, S., & Rastegari, M. (2022). *Separable self-attention for mobile vision transformers* (arXiv:2206.02680). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2206.02680>

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2019). *MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks* (arXiv:1801.04381v4). arXiv. <https://arxiv.org/abs/1801.04381>

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (pp. 618–626). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74>

Wadekar, S. N., Kan, K., Patel, K. K., Kudugunta, S., & Mehta, S. (2022). *MobileViTv3: Mobile-friendly vision transformer with simple and effective fusion of local and global features* (arXiv:2209.15159). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.15159>

1. Composant fondamental des CNN, la couche de convolution permet d’extraire automatiquement les caractéristiques locales d’une image en appliquant des filtres (ou noyaux), qui sont des petites matrices de poids, en glissement sur l’image en entrée pour calculer des sommes pondérées et générer des cartes de caractéristiques (“feature maps”) qui permettent de détecter des motifs comme des bords, des textures ou des formes ; la succession de ces couches dans un CNN permet de construire des représentations hiérarchiques de plus en plus abstraites, en utilisant des poids partages et une connectivité locale. [↑](#footnote-ref-1)
2. Le ResNet50 et ses variantes ont remporté la 1ʳᵉ place dans plusieurs compétitions majeures en 2015 (ILSVRC, COCO), affichant par exemple un taux d’erreur Top-5 de 3,57 % sur ImageNet. [↑](#footnote-ref-2)
3. Il faut noter qu’en pratique, les blocs résiduels de type “bottleneck” sont utilisés dans les architectures ResNet plus profondes, comme ResNet-101 et ResNet-152, car ces blocs bottleneck sont moins coûteux en calcul. Un bloc résiduel “bottleneck” est une variante du bloc résiduel qui utilise des convolutions 1×1 pour créer un ‘goulet d’étranglement’ et permettre de réduire le nombre de paramètres et de multiplications de matrices. Source : https://paperswithcode.com/method/bottleneck-residual-block [↑](#footnote-ref-3)
4. Pour les besoins de l’apprentissage profond et des CNN, tout jeu d’apprentissage comportant moins de 1000 images est considéré comme un petit jeu. [↑](#footnote-ref-4)
5. Les premières couches détectent des bords et des textures, tandis que les couches profondes capturent des objets ou des concepts plus abstraits. [↑](#footnote-ref-5)
6. La complexité quadratique de l’attention multi-tête étant remplacée par une complexité linéaire. Add link to paper Mehta Rastegari 2022. [↑](#footnote-ref-6)
7. Ref to paper 2024 [↑](#footnote-ref-7)
8. Une comparaison sur ImageNet fait apparaître que MobileViTv2 surpasse MobileViTv1 en précision tout en ne requérant que moities moins d’opérations et un tiers de paramètres en moins. Voir [insert ref to Paper sandler 2019] [↑](#footnote-ref-8)
9. **Source :** [**https://arxiv.org/pdf/2110.02178**](https://arxiv.org/pdf/2110.02178) [↑](#footnote-ref-9)
10. **Source : https://arxiv.org/pdf/2206.02680** [↑](#footnote-ref-10)
11. B est un hyperparamètre structurel qui vaut entre 2 et 4 selon la position du bloc dans le modèle. [↑](#footnote-ref-11)
12. L’attention (« self-attention ») est un mécanisme central dans les modèles transformer, qui leur permet de se focaliser dynamiquement sur les parties les plus pertinentes de l’image d’entrée lors des prédictions, privilégiant certaines régions ou caractéristiques importantes d’une image, de façon similaire a une personne concentrant son regard sur des éléments distinctifs pour reconnaître une image. [↑](#footnote-ref-12)
13. SOURCE !! [↑](#footnote-ref-13)
14. Ou k représente le nombre de tokens dans l’image. [↑](#footnote-ref-14)
15. **Source : https://arxiv.org/pdf/2206.02680** [↑](#footnote-ref-15)
16. Cite paper 2019 sandler here. [↑](#footnote-ref-16)
17. Add link to selvaraju 2017 paper here [↑](#footnote-ref-17)