

Soutenance de thèse de doctorat de l'Université de Lorraine

Détection des anévrismes intracrâniens par apprentissage profond

Présentée et soutenue publiquement le 22 mars 2024

Youssef Assis

Rapporteurs :	Christine Fernandez-Maloigne	Professeure - Université de Poitiers
	Antoine Vacavant	Professeur - Université Clermont Auvergne
Examinatrices :	Carole Lartizien	Directrice de recherche - CNRS
	Carole Le Guyader	Professeure - INSA Rouen Normandie
Encadrants :	René Anxionnat	Professeur - Université de Lorraine
	Erwan Kerrien	Chargé de recherche - Inria
	Fabien Pierre	Maître de conférences - Université de Lorraine

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

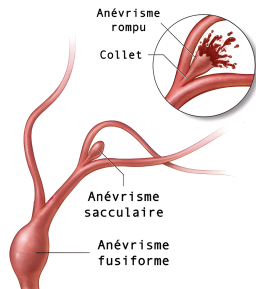
Contexte et motivations

Anévrismes intracrâniens

- Dilatations focales des vaisseaux sanguins cérébraux.
- **Prévalence** : 3 à 6% de la population.
- **Taille et forme** : 1 à 30 mm, souvent sacculaires.
- **Cause** : fragilité des parois vasculaires.
- **Risques** : rupture → taux élevés de mortalité et morbidité.

Diagnostic des anévrismes : modalités d'imagerie

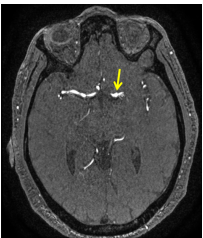
- ✗ Angiographie numérique soustraite (DSA).
- ✗ Angiographie par tomodensitométrie (CTA).
- ✓ Angiographie par résonance magnétique en temps de vol (TOF-MRA).



Détection des anévrismes

Détection des anévrismes par experts cliniques

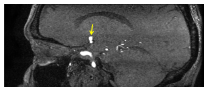
- Analyse des plans de coupes en 2D.
- Processus chronophage et difficile :
 - Risque d'erreurs : omission d'anévrismes et faux positifs.
 - Sensibilité de 60 à 88,1% ; jusqu'à 35% pour les anévrismes < 3 mm [Okahara et al., 2002].



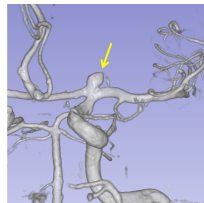
(a) Axial



(b) Sagittal



(c) Coronal



(d) Rendu du volume

Figure 1 – Exemple d'image TOF-MRA présentant un anévrisme de 4,83 mm.

Contexte et objectifs de la thèse

Outil automatique d'assistance au diagnostic des anévrismes

1 Détection automatisée

- Focalisation sur les anévrismes de moins de 5 mm.
- Taux de faux positifs adapté.

2 Visualisation appropriée

- Plan de coupe optimal pour les anévrismes.

Défis liés aux techniques d'apprentissage profond

- **Rareté de données** : ensembles de données limités et privés.
- **Annotation de données** : difficile et chronophage.
- **Déséquilibre de classes** : petite taille et faible fréquence des anévrismes.
- **Puissance de calcul** : données 3D.

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

Types d'approches

Approches par segmentation d'images : majorité de travaux

- Attribution de probabilités à chaque voxel de l'image.
- Post-traitement : voxels → objets
 - Seuillage, extraction, et filtrage de composantes connexes (CC).
- Évaluation : métriques de segmentation (Dice).

Approches par détection d'objets : minorité de travaux

- Localisation des anévrismes par boîtes englobantes.
- Configuration complexe :
 - Définition et gestion d'ancres.
 - Plusieurs fonctions de coût.
- Évaluation : métrique de précision moyenne (AP).

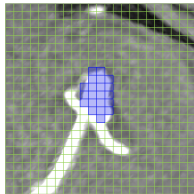
Types d'approches

Approches par segmentation d'images : majorité de travaux

- Attribution de probabilités à chaque voxel de l'image.
- Post-traitement : voxels → objets
 - Seuillage, extraction, et filtrage de composantes connexes (CC).
- Évaluation : métriques de segmentation (Dice).

Approches par détection d'objets : minorité de travaux

- Localisation des anévrismes par boîtes englobantes.
- Configuration complexe :
 - Définition et gestion d'ancres.
 - Plusieurs fonctions de coût.
- Évaluation : métrique de précision moyenne (AP).



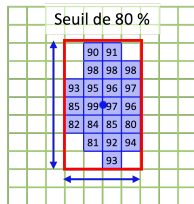
Types d'approches

Approches par segmentation d'images : majorité de travaux

- Attribution de probabilités à chaque voxel de l'image.
- Post-traitement : voxels → objets
 - Seuillage, extraction, et filtrage de composantes connexes (CC).
- Évaluation : métriques de segmentation (Dice).

Approches par détection d'objets : minorité de travaux

- Localisation des anévrismes par boîtes englobantes.
- Configuration complexe :
 - Définition et gestion d'ancres.
 - Plusieurs fonctions de coût.
- Évaluation : métrique de précision moyenne (AP).



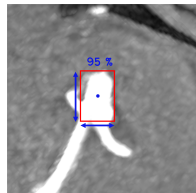
Types d'approches

Approches par segmentation d'images : majorité de travaux

- Attribution de probabilités à chaque voxel de l'image.
- Post-traitement : voxels → objets
 - Seuillage, extraction, et filtrage de composantes connexes (CC).
- Évaluation : métriques de segmentation (Dice).

Approches par détection d'objets : minorité de travaux

- Localisation des anévrismes par boîtes englobantes.
- Configuration complexe :
 - Définition et gestion d'ancres.
 - Plusieurs fonctions de coût.
- Évaluation : métrique de précision moyenne (AP).



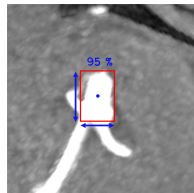
Types d'approches

Approches par segmentation d'images : majorité de travaux

- Attribution de probabilités à chaque voxel de l'image.
- Post-traitement : voxels → objets
 - Seuillage, extraction, et filtrage de composantes connexes (CC).
- Évaluation : métriques de segmentation (Dice).

Approches par détection d'objets : minorité de travaux

- Localisation des anévrismes par boîtes englobantes.
- Configuration complexe :
 - Définition et gestion d'ancres.
 - Plusieurs fonctions de coût.
- Évaluation : métrique de précision moyenne (AP).



Travaux existants - Avant le début de la thèse

Approches en 2D (à partir de 2017)

- Transformation d'images 3D en images 2D.
- Perte d'information anatomique : taux élevé de faux positifs (FP).

Approches en 3D (à partir de 2019)

- **Approche par patches** : extraction de sous-volumes d'images.
 - Entraînement : patches individuels.
 - Inférence : reconstruction par patches.
- Diversité d'architectures de CNN et de fonctions de coût.

→ Difficultés de comparaison : données limitées et privées, variété des métriques.

Travaux existants - Après le début de la thèse

Compétition ADAM¹ 2020

Méthodes proposées

- Approches par segmentation d'images : UNet 3D [Çiçek et al., 2016].
- **Échantillonnage de données** : grands patches, sélection aléatoire.
- **Fonction de coût** : entropie croisée binaire (BCE) et Dice.
- **Frameworks** : nnUNet [Isensee et al., 2021] et nnDetection [Baumgartner et al., 2021].
- **Post-traitement** : apprentissage ensembliste, filtrage de prédictions.

Évaluation : sensibilité et FP/cas

- Anévrismes représentés par sphères : TP si centre de prédiction est dans la sphère.
- Manque de profondeur d'analyse → étude par ablation et validation croisée.

1. Aneurysm Detection and Segmentation Challenge (ADAM)

Nos contributions

Aperçu général

① Détection des anévrismes

- Travaux existants : Absence d'approches axées sur les données.
- Notre contribution² : Stratégie de gestion de données adaptée.

② Amélioration des performances de détection

- Travaux existants : Approches par segmentation avec post-traitement.
- Notre contribution³ : Approche de détection d'objets par sphères, sans ancres

③ Visualisation des anévrismes

- Travaux existants : Segmentation inutile en diagnostic.
- Notre contribution⁴ : Estimation de la pose d'anévrismes.

2. Assis et al., An efficient data strategy for the detection of brain aneurysms from MRA with deep learning, DALI, 2021.

3. Assis et al., Intracranial Aneurysm Detection : An object detection perspective, IJCARS, 2024.

4. Assis et al., Aneurysm Pose Estimation with Deep Learning, MICCAI, 2023, STAR award recipient.

Nos contributions

Aperçu général

① Détection des anévrismes

- Travaux existants : Absence d'approches axées sur les données.
- Notre contribution² : Stratégie de gestion de données adaptée.

② Amélioration des performances de détection

- Travaux existants : Approches par segmentation avec post-traitement.
- Notre contribution³ : Approche de détection d'objets par sphères, sans ancres

③ Visualisation des anévrismes

- Travaux existants : Segmentation inutile en diagnostic.
- Notre contribution⁴ : Estimation de la pose d'anévrismes.

2. Assis et al., An efficient data strategy for the detection of brain aneurysms from MRA with deep learning, DALI, 2021.

3. Assis et al., Intracranial Aneurysm Detection : An object detection perspective, IJCARS, 2024.

4. Assis et al., Aneurysm Pose Estimation with Deep Learning, MICCAI, 2023, STAR award recipient.

Nos contributions

Aperçu général

① Détection des anévrismes

- Travaux existants : Absence d'approches axées sur les données.
- Notre contribution² : Stratégie de gestion de données adaptée.

② Amélioration des performances de détection

- Travaux existants : Approches par segmentation avec post-traitement.
- Notre contribution³ : Approche de détection d'objets par sphères, sans ancres

③ Visualisation des anévrismes

- Travaux existants : Segmentation inutile en diagnostic.
- Notre contribution⁴ : Estimation de la pose d'anévrismes.

2. Assis et al., An efficient data strategy for the detection of brain aneurysms from MRA with deep learning, DALI, 2021.

3. Assis et al., Intracranial Aneurysm Detection : An object detection perspective, IJCARS, 2024.

4. Assis et al., Aneurysm Pose Estimation with Deep Learning, MICCAI, 2023, STAR award recipient.

Nos contributions

Méthodologie générale d'analyse et d'évaluation

1 Métriques de détection d'objets

- Anévrismes et prédictions représentés par sphères.
- Métrique de précision moyenne (AP).
- Critère d'intersection sur l'union (IoU), avec seuil de 10%.
- Métriques de sensibilité et FP/cas.

2 Méthodologie d'évaluation

- Étude par ablation : CHRU de Nancy (132 images, 206 anévrismes).
- Validation croisée à 5 plis : CHUV de Lausanne⁵ (270 images, 164 anévrismes).
- Comparaison avec les méthodes de référence.
- Évaluation par experts cliniques.

5. Di Noto et al., Towards automated brain aneurysm detection in TOF-MRA : open data, weak labels, and anatomical knowledge, 2022

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes**
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

Stratégie de gestion de données efficace

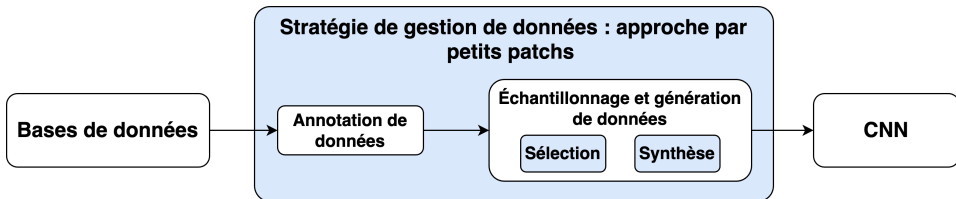
Méthode proposée : Focalisation sur les données

1 Rareté de données

- Annotation de données rapide.
- Approche par petits patches.

2 Nombre, diversité et indépendance des données en entrée

- Sélection guidée de patches négatifs (sans anévrisme).
- Synthèse de patches positifs (avec anévrisme).



Annotation de données

Annotation approximative et rapide

- Sphères : collet (P1) et dôme (P2).
- 4 fois plus rapide que l'annotation par voxel [Di Noto et al., 2022].

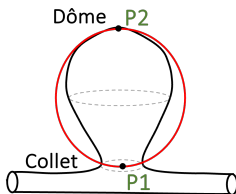
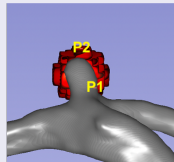


Figure 2 – Approximation du volume de l'anévrisme par une sphère.

Approche par petits patches

Petits patches et non superposés

- Patches isotropes de $48 \times 48 \times 48$ voxels → moins de ressources de calcul.
- Multiples patches par image → ensemble d'entraînement large.
- Patches non superposés → indépendants → variété de l'entraînement.

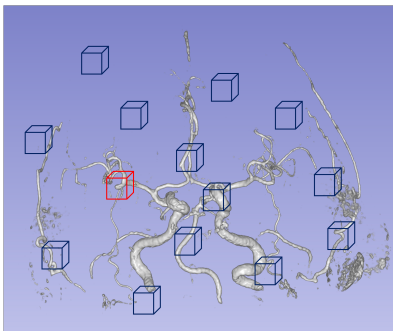


Figure 3 – Rendu du volume d'une image TOF-MRA avec un anévrisme de 4,08 mm (rouge).

Échantillonnage et génération de données

- **Sélection guidée de patches négatifs (sans anévrisme)**
 - 200 patches sélectionnés par image, moitié sur les vaisseaux.
- **Synthèse de patches positifs (avec anévrisme)**
 - Duplication 50 fois avec déformations aléatoires (0 à 3 mm) pour diversité de forme.

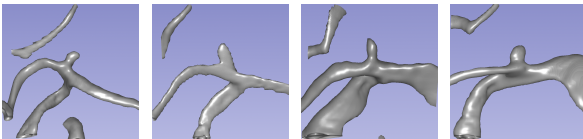


Figure 4 – Diverses formes d'anévrismes générés à partir d'un anévrisme de 2,92 mm.

- **Augmentation de données**
 - Translations (0 – 10 mm) et rotations (0 – 180°) aléatoires.

Réseau de neurones

- Réseau UNet 3D standard, BCE comme fonction de coût.
- Configuration simple : 100 époques et taux d'apprentissage fixe.

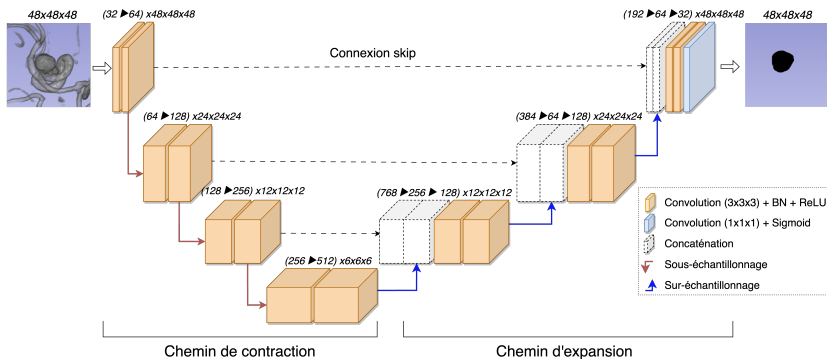


Figure 5 – Architecture du réseau UNet 3D.

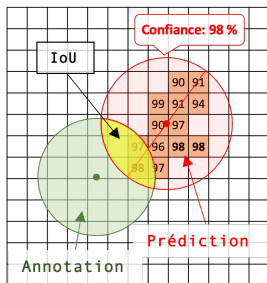
Métriques d'évaluation

Extraction de composantes connexes (CC)

- Seuillage à 1% pour éliminer le bruit.
- **Sans filtrage de CC.**
- CC → sphères :
 - Centre : centre de gravité de la CC.
 - Diamètre : distance maximale entre voxels de la CC.
 - Score de confiance : valeur maximale prédite dans la CC.

Calcul des métriques d'évaluation

- Vrai positif (TP) si $\text{IoU} \geq 10\%$, sinon faux négatif (FN).
- Faux positif (FP) si $\text{IoU} < 10\%$.
- Un seul TP par annotation, FP sinon (max IoU).



Validation croisée à 5 plis - CHRU de Nancy

- Répartition des données : 4 plis d'entraînement et 1 pli de test.
 - **Écart-types** calculés à partir des résultats sur les 5 plis de test.
- Comparaison avec le Framework nnUNet
 - Grands patches, une variante du réseau UNet 3D.
 - Post-traitement : apprentissage ensembliste et filtrage des CC par taille.

Méthodes	Précision moyenne (%)	Sensibilité (%)	FP/cas
Notre méthode	62,10 ± 5,80	69,76 ± 5,41	0,63 ± 0,27
nnUNet	65,81 ± 4,40	72,10 ± 4,13	0,42 ± 0,10

Table 1 – Validation croisée à 5 plis sur l'ensemble de données du CHRU de Nancy.

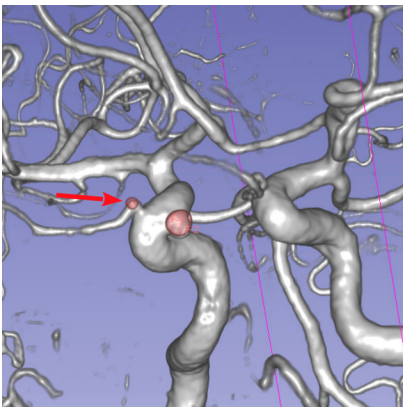
Validation croisée à 5 plis - CHRU de Nancy

- Répartition des données : 4 plis d'entraînement et 1 pli de test.
 - **Écart-types** calculés à partir des résultats sur les 5 plis de test.
- Comparaison avec le Framework nnUNet
 - Grands patches, une variante du réseau UNet 3D.
 - Post-traitement : apprentissage ensembliste et filtrage des CC par taille.

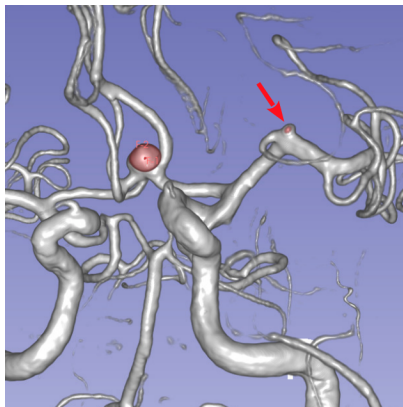
Méthodes	Précision moyenne (%)	Sensibilité (%)	FP/cas
Notre méthode	62,10 ± 5,80	69,76 ± 5,41	0,63 ± 0,27
nnUNet	65,81 ± 4,40	72,10 ± 4,13	0,42 ± 0,10

Table 1 – Validation croisée à 5 plis sur l'ensemble de données du CHRU de Nancy.

Résultats visuels et discussion



(a) FP



(b) FP → TP

Figure 6 – (a) Ramification des petites artères confondue avec anévrisme. (b) Anévrisme omis lors de l'annotation initiale.

Résultats visuels et discussion

Évaluation par experts - Données du CHRU Nancy

- Évaluation par deux experts : 14 et 32 ans d'expérience.
- Visualisation des détections et anévrismes non détectés.
- Mise à jour des annotations : 18 anévrismes ajoutés, 2 retirés.
- **Annotateur : sensibilité de 89,47% avec 0,018 FP/cas.**

Limitations des approches par segmentation d'images

- Dépendance à la qualité de segmentation et au post-traitement.
- Impact négatif sur la détection d'anévrismes de petite taille (quelques voxels).
- Sensibilité par taille : **< 3mm à 51,66% ; 3 – 5mm à 89,39% ; > 5mm à 89,65%.**

Résultats visuels et discussion

Évaluation par experts - Données du CHRU Nancy

- Évaluation par deux experts : 14 et 32 ans d'expérience.
- Visualisation des détections et anévrismes non détectés.
- Mise à jour des annotations : 18 anévrismes ajoutés, 2 retirés.
- **Annotateur : sensibilité de 89,47% avec 0,018 FP/cas.**

Limitations des approches par segmentation d'images

- Dépendance à la qualité de segmentation et au post-traitement.
- Impact négatif sur la détection d'anévrismes de petite taille (quelques voxels).
- Sensibilité par taille : **< 3mm à 51,66% ; 3 – 5mm à 89,39% ; > 5mm à 89,65%.**

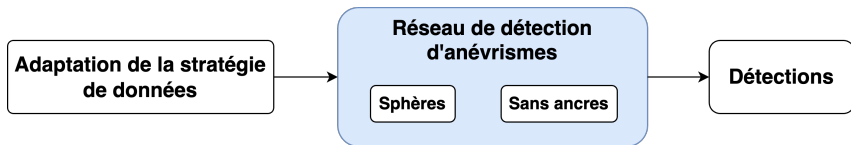
Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)**
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

Détection des anévrismes : approche de détection d'objet (DeepAneDet)

Méthode proposée

- Localisation directe des anévrismes sans nécessiter de post-traitement.
- **Détection sans ancrés**
 - Moins d'hyperparamètres.
- **Détection par sphères**
 - Localisation plus précise.
 - Applicable en pratique clinique : calcul de la taille.



Réseau de détection : sans ancres et par sphères

- Sphère : centre (C_x, C_y, C_z) , rayon (r) , score de confiance.
- Patch de $96 \times 96 \times 96$ divisé en $12 \times 12 \times 12 = 1728$ cellules.
- Une cellule prédit un anévrisme si son centre est à l'intérieur.

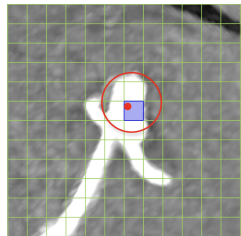
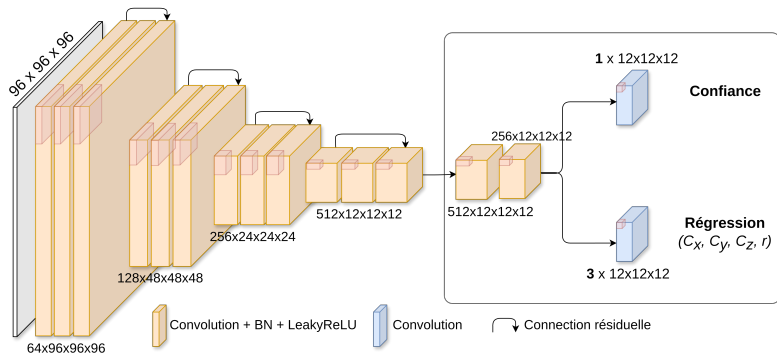


Figure 7 – Réseau proposé pour la détection d'anévrismes par sphères.

Fonction de coût : déséquilibre de classes

- Grand déséquilibre entre cellules positives (P) et négatives (N).
- Fonction de coût pondérée :

$$\text{Coût total} = \text{Classification} + \text{Régression} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Classification } (P, N) = \text{BCE}(P) + 0.5 \times \#P \times \text{BCE}(N) \\ \text{Régression } (P) = 5 \times \sum_{i=1}^{\#P} \text{MSE}(C_{xi}, C_{yi}, C_{zi}, r_i) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Classification } (P, N) = \text{BCE}(P) + 0.5 \times \#P \times \text{BCE}(N) \\ \text{Régression } (P) = 5 \times \sum_{i=1}^{\#P} \text{MSE}(C_{xi}, C_{yi}, C_{zi}, r_i) \end{array} \right. \quad (3)$$

avec $\#P$: nombre de cellules positives dans le lot d'entraînement.

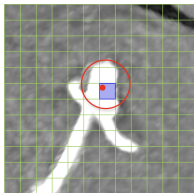


Figure 8 – Patch de 96^3 : seulement 1 sur 1728 cellules est positive ($\approx 0,057\%$).

-
- . Entropie croisée binaire (BCE)
 - . Erreur quadratique moyenne (MSE)

Adaptation de la stratégie de données

Approche par petits patchs : $96 \times 96 \times 96$ voxels

- Amélioration de l'équilibre sensibilité/faux positifs.

Échantillonnage et génération de données

- Patchs non superposés : 40 patchs négatifs par image.
- 50 duplications et déformation de patchs positifs.

Gestion des patchs durant l'entraînement

- Patchs d'entraînement = 75% positifs + 15% négatifs (sélection aléatoire par époque).

Méthodes de référence

- nnUNet [Isensee et al., 2021] : Segmentation d'images.
- nnDetection [Baumgartner et al., 2021] : Détection d'objets avec boîtes, 27 ancres.

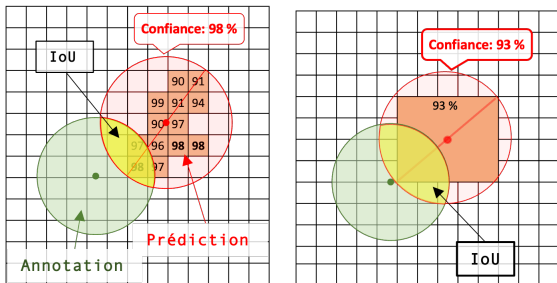


Figure 9 – Conversion de prédictions de nnUNet (gauche) et nnDetection (droite) en sphères.

Validation croisée à 5 plis - CHUV Lausanne

Annotations initiales

- 1 Répartition de données : 4 plis d'entraînement, 1 pli de test.
- 2 5 modèles par méthode : DeepAneDet, nnDetection, nnUNet.
- 3 Analyse visuelle des prédictions : de nombreux faux positifs sont de vrais positifs.

Évaluation clinique - Données du CHUV Lausanne

- Révision indépendante par deux experts : 14 et 32 ans d'expérience.
- Pour chaque méthode : évaluation des prédictions et ajout des anévrismes.
- Consensus dans 7,6% de cas (désaccords).
- Mise à jour des annotations : 23 anévrismes ajoutés, 13 retirés (de 164 à 174 anévrismes).
- **Annotateur : sensibilité de 82,7% avec 0,07 FP/cas.**

Validation croisée à 5 plis - CHUV Lausanne

Annotations initiales

- 1 Répartition de données : 4 plis d'entraînement, 1 pli de test.
- 2 5 modèles par méthode : DeepAneDet, nnDetection, nnUNet.
- 3 Analyse visuelle des prédictions : de nombreux faux positifs sont de vrais positifs.

Évaluation clinique - Données du CHUV Lausanne

- Révision indépendante par deux experts : 14 et 32 ans d'expérience.
- Pour chaque méthode : évaluation des prédictions et ajout des anévrismes.
- Consensus dans 7,6% de cas (désaccords).
- Mise à jour des annotations : 23 anévrismes ajoutés, 13 retirés (de 164 à 174 anévrismes).
- **Annotateur : sensibilité de 82,7% avec 0,07 FP/cas.**

Validation croisée à 5 plis - CHUV Lausanne

Évaluation par experts

- Performance améliorée : capacité à apprendre avec des données bruitées.
- Sensibilité supérieure à celle de l'annotateur.
- Sensibilité par taille : < 3mm à 77,21%, 3 – 5mm à 98,59%, > 5mm à 83,33%.

Méthodes	Précision moyenne (%)	Sensibilité (%)	FP/case
DeepAneDet	78,96 ± 5,24	86,78 ± 3,98	0,53 ± 0,14
nnDetection	78,01 ± 6,07	86,78 ± 6,16	0,63 ± 0,10
nnUNet	73,47 ± 4,17	71,26 ± 8,09	0,11 ± 0,04

Table 2 – Méthodes entraînées sur annotations initiales et évaluées par experts.

Résultats visuelles

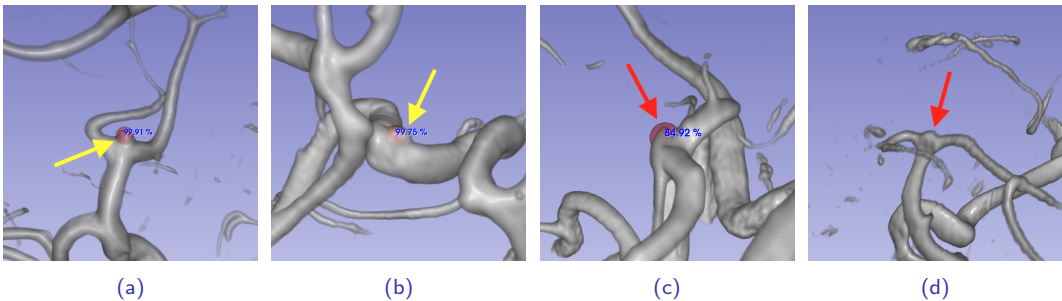


Figure 10 – (a, b) Petits anévrismes détectés par notre méthode (taille : 1,90 et 1,65 mm). (c) Cas de faux positifs. (d) Anévrisme de 1,91 mm non détecté.

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)**
- 6 Conclusion

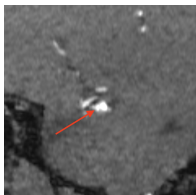
Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)

Méthode proposée : coupes reformatées pour une meilleure analyse

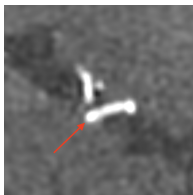
- Pratique clinique
 - Analyse à travers les plans de coupes canoniques.
 - Évaluation limitée : forme, taille, vaisseaux voisins.
- Coupes reformatées : localisation et orientation (pose) d'anévrismes.



(a) Axial



(b) Sagittal



(c) Coronal



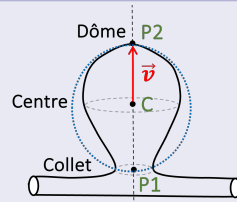
(d) Reformaté

Figure 11 – Anévrisme de 2,69 mm : (a, b, c) plans de coupes canoniques, et (d) plan de coupe reformaté.

Annotation et préparation de données

Pose des anévrismes : approche par points de repère

- Centre $C = (C_x, C_y, C_z) = (P1 + P2)/2$: Localisation.
- Vecteur $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = P2 - C$: Taille $|\vec{v}|$ et orientation $\vec{v}/|\vec{v}|$.
- Chaque plan de coupe reformaté est déterminé en tournant autour du vecteur \vec{v} .



Réseau de neurones

- Pose d'anévrisme : centre (C_x, C_y, C_z), vecteur d'axe (\vec{v}), score de confiance.
- Patches $96 \times 96 \times 96$ divisé en $12 \times 12 \times 12 = 1728$ cellules ($8 \times 8 \times 8$ chacune).
- Une cellule prédit un anévrisme si son centre est à l'intérieur.

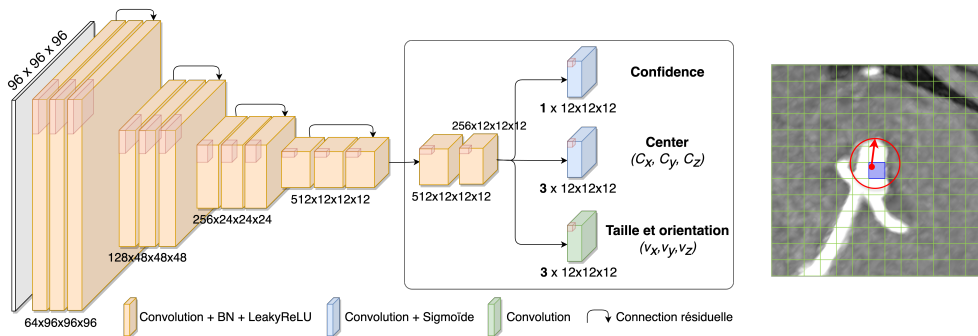


Figure 12 – Réseau proposée pour l'estimation de la pose des anévrismes.

Fonction de coût : déséquilibre de classes

- Grand déséquilibre entre cellules positives (P) et négatives (N).
- Fonction de coût pondérée :

$$\text{Coût total} = \text{Classification} + \text{Régression} + \text{Orientation} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Classification } (P, N) = \text{BCE}(P) + 0.5 \times \#P \times \text{BCE}(N) \\ \text{Régression } (P) = 5 \times \sum_{i=1}^{\#P} \text{MSE}(C_{xi}, C_{yi}, C_{zi}, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) \\ \text{Orientation } (P) = 5 \times \sum_{i=1}^{\#P} (1 - \text{Similarité Cosinus}(\vec{v}_i)) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\quad (6)$$

$$\quad (7)$$

avec $\#P$: nombre de cellules positives dans le lot d'entraînement.

-
- . Entropie croisée binaire (BCE)
 - . Erreur quadratique moyenne (MSE)

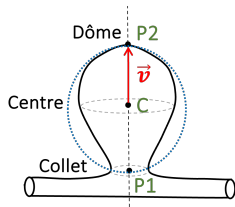
Métriques d'évaluation

1 Détection des anévrismes

- Seuil IoU de 10% entre sphères.
- Comparée à DeepAneDet, nnDetection et nnUNet.

2 Estimation de la pose d'anévrismes

- Basée sur les anévrismes correctement détectés (sensibilité @ 50%).
- **Localisation (mm)** : distance euclidienne entre les centres C .
- **Orientation (°)** : erreur angulaire entre les vecteurs d'axe \vec{v} .



Validation croisée à 5 plis - CHUV de Lausanne

Détection des anévrismes

Méthodes	Précision moyenne (%)	Sensibilité (%)	FP/case
DeepAnePose	$78,51 \pm 3,61$	$83,91 \pm 4,77$	$0,40 \pm 0,04$
DeepAneDet	$78,96 \pm 5,24$	$86,78 \pm 3,98$	$0,53 \pm 0,14$
nnDetection	$78,01 \pm 6,07$	$86,78 \pm 6,16$	$0,63 \pm 0,10$
nnUNet	$73,47 \pm 4,17$	$71,26 \pm 8,09$	$0,11 \pm 0,04$

Table 3 – Méthodes entraînées sur annotations initiales et évaluées sur annotations révisées.

- Performances compétitives face aux méthodes spécialisées en détection.
- Faibles écarts-types indiquant la robustesse de la méthode.

Validation croisée à 5 plis - CHUV de Lausanne

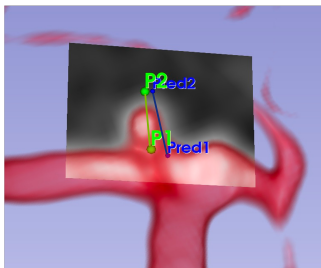
Estimation de la pose des anévrismes

Méthodes	Erreur de localisation (mm)		Erreur d'orientation (°)	
	Médiane	Min-Max	Médiane	Min-Max
DeepAnePose	0,45	0,05 – 1,40	11,36	1,05 – 68,30
DeepAneDet	0,56	0,11 – 2,41	–	–

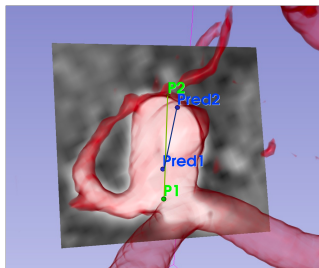
Table 4 – Méthodes entraînées sur annotations initiales et évaluées sur annotations révisées.

- Faible erreur de localisation, comparable à la taille des voxels IRM (0,4 à 0,7 mm³).
- Estimation d'orientation adaptée, erreurs élevées pour les anévrismes de formes complexes.

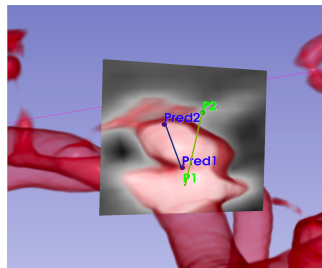
Résultats visuels



(a) Anévrisme de 1,97 mm
Erreur : 0,82mm/8,2°



(b) Anévrisme de 7,69 mm
Erreur : 0,72mm/10,62°



(c) Anévrisme de 3,52 mm
Erreur : 0,70mm/41,54°

Figure 13 – Points d'annotation (vert) et de prédiction (bleu). Chaque plan de coupe reformaté a été déterminé en tournant autour de l'axe de l'anévrisme passant par les points prédits.

Résultats visuels

Importance d'une définition clinique de la notion d'orientation d'anévrismes

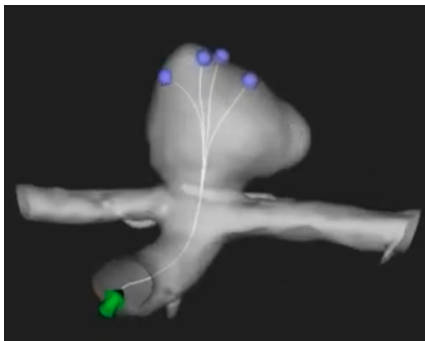


Figure 14 – Difficulté à déterminer l'orientation des anévrismes présentant une forme complexe.
Sim&Cure ©

Plan de présentation

- 1 Introduction
- 2 État de l'art en détection d'anévrismes
- 3 Stratégie de gestion de données efficace pour la détection des anévrismes
- 4 Détection des anévrismes : approche de détection d'objets (DeepAneDet)
- 5 Estimation de la pose des anévrismes (DeepAnePose)
- 6 Conclusion

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Résumé des contributions

- 1 Détection des anévrismes est difficile pour les experts (sensibilité : 82,7%).
- 2 Stratégie de gestion de données adaptée.
- 3 Amélioration des performances de détection
 - Sensibilité supérieure à celle des experts malgré le bruit d'annotation.
 - Amélioration de la détection des petits anévrismes (< 5 mm).
- 4 Estimation de la pose des anévrismes, démontrant une utilité clinique
- 5 Méthodologie : métriques, études par ablation, validation croisée et évaluation clinique.
- 6 Modèles et outils 3D Slicer disponibles sur : <https://gitlab.inria.fr/yassis>.

Perspectives futures

- 1 Extension et amélioration des ensembles de données
 - Améliorer la fiabilité : annotation par plusieurs experts.
 - Faciliter l'annotation : notre approche d'annotation, SAM⁷.
- 2 Annotations multiples : modélisation de variabilité d'annotation par réseaux de neurones.
- 3 Rareté des anévrismes : synthèse à partir de vaisseaux sains.
- 4 Évaluation du risque de rupture
 - Mesures : taille, angle d'écoulement, connexion avec vaisseau parent.
 - Modalités thérapeutiques : 3DRA⁸.

7. Segment Anything Model (SAM)

8. Angiographie rotationnelle tridimensionnelle (3DRA)

Perspectives futures

- 1 Extension et amélioration des ensembles de données
 - Améliorer la fiabilité : annotation par plusieurs experts.
 - Faciliter l'annotation : notre approche d'annotation, SAM⁷.
- 2 Annotations multiples : modélisation de variabilité d'annotation par réseaux de neurones.
- 3 Rareté des anévrismes : synthèse à partir de vaisseaux sains.
- 4 Évaluation du risque de rupture
 - Mesures : taille, angle d'écoulement, connexion avec vaisseau parent.
 - Modalités thérapeutiques : 3DRA⁸.

7. Segment Anything Model (SAM)

8. Angiographie rotationnelle tridimensionnelle (3DRA)

Perspectives futures

- ① Extension et amélioration des ensembles de données
 - Améliorer la fiabilité : annotation par plusieurs experts.
 - Faciliter l'annotation : notre approche d'annotation, SAM⁷.
- ② Annotations multiples : modélisation de variabilité d'annotation par réseaux de neurones.
- ③ Rareté des anévrismes : synthèse à partir de vaisseaux sains.
- ④ Évaluation du risque de rupture
 - Mesures : taille, angle d'écoulement, connexion avec vaisseau parent.
 - Modalités thérapeutiques : 3DRA⁸.

7. Segment Anything Model (SAM)

8. Angiographie rotationnelle tridimensionnelle (3DRA)







Perspectives futures

- ① Extension et amélioration des ensembles de données
 - Améliorer la fiabilité : annotation par plusieurs experts.
 - Faciliter l'annotation : notre approche d'annotation, SAM⁷.
- ② Annotations multiples : modélisation de variabilité d'annotation par réseaux de neurones.
- ③ Rareté des anévrismes : synthèse à partir de vaisseaux sains.
- ④ Évaluation du risque de rupture
 - Mesures : taille, angle d'écoulement, connexion avec vaisseau parent.
 - Modalités thérapeutiques : 3DRA⁸.

7. Segment Anything Model (SAM)

8. Angiographie rotationnelle tridimensionnelle (3DRA)

Publications et communications

-  Youssef Assis, Liang Liao, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
An efficient data strategy for the detection of brain aneurysms from MRA with deep learning
Deep Generative Models, and Data Augmentation, Labelling, and Imperfections (DALI@MICCAI), 2021.
-  Youssef Assis, Liang Liao, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
An efficient data strategy for the detection of brain aneurysms from MRA with deep learning
18ème journées francophones des jeunes chercheurs en vision par ordinateur (ORASIS), 2021.
-  Liang Liao, Youssef Assis, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
Une stratégie efficace de préparation des données pour la détection des anévrismes cérébraux en IRM 3D-TOF par deep learning
Société Française de Neuroradiologie (SFNR), 2022.
-  Youssef Assis, Liang Liao, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
Intracranial Aneurysm Detection using Spherical Representation
Colloque Français d'Intelligence Artificielle en Imagerie Biomédicale (IABM), 2023.
-  Youssef Assis, Liang Liao, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
Aneurysm Pose Estimation with Deep Learning
Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI), 2023.
-  Youssef Assis, Liang Liao, Fabien Pierre, René Anxionnat, and Erwan Kerrien
Intracranial Aneurysm Detection : An object detection perspective
International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (IJCARS), 2024.