

Amélioration de la segmentation de scènes par l'exploitation de relations spatiales : application aux sceaux byzantins

Ege Şendoğan¹, Victoria Eyharabide², Isabelle Bloch¹

¹Sorbonne Université, CNRS, LIP6, Paris, France

²Sorbonne Université, STIH, Paris, France

Journée Humanités Numériques & IA, 4 juillet 2025, Dijon

Le contexte historique : Empire byzantin

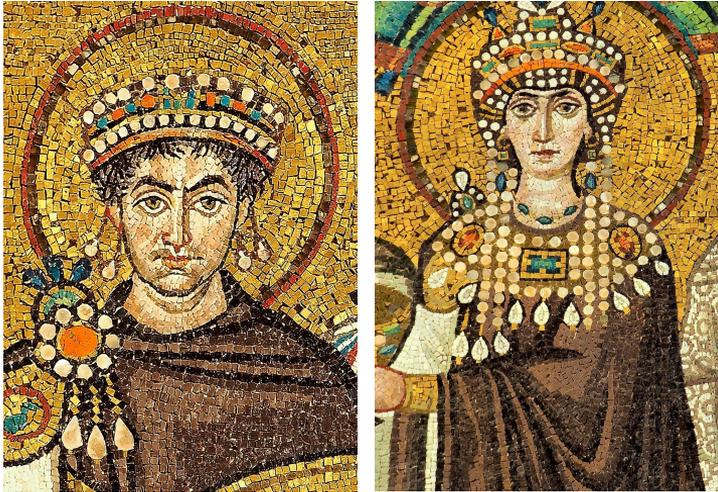


Figure : L'empereur Justinien et l'impératrice Théodora. Mosaïques de la basilique Saint-Vital à Ravenne.

- De 330 à 1453.
- Empire romain d'Orient.
- Sa capitale, Constantinople (Istanbul), a été fondée par Constantin I^{er}.
- A dominé des régions d'Europe du Sud-Est, d'Asie Mineure, du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord.
- Ce fut la puissance médiévale la plus durable.

L'Empire a laissé au monde un héritage culturel, religieux et juridique important.

Le contexte historique : sceaux byzantins



Figure : L'avant et le verso d'un sceau en plomb. Les sceaux byzantins de la collection Henri Seyrig [FAILLER, Albert. Jean-Claude Cheynet, Cécile Morrisson et Werner Seibt (Éd.), Les sceaux byzantins de la Collection Henri Seyrig. Revue des études byzantines, 1993, vol. 51, no 1.].

- Utilisés pour :
 - Sécuriser et authentifier des documents.
 - Exprimer l'identité du propriétaire.

Des sources d'information essentiels pour les historiens qui étudient l'Empire byzantin.

Le contexte historique : sceaux byzantins



Figure : La Vierge Marie, à gauche, se tenant debout sur un souppedion, les mains tendues touchant la maquette de Sainte-Sophie, représentée au centre du champ, que Justinien tient à deux mains. MAH Musée d'art et d'histoire, Ville de Genève. Don de la Fondation Migore, legs Janet Zakos, 2004, CdN 2004-0438.

- L'imagerie figurative des sceaux byzantins présente un nombre significatif d'exemples d'iconographie religieuse.

But : Automatiser cette tâche.

Méthodes : intelligence artificielle hybride



Intégration de connaissances sur l'agencement spatial des objets pour guider l'entraînement de réseau de neurones.

Figure : Sceaux représentant le buste de la Vierge orante, portant le médaillon du Christ devant la poitrine. Les sceaux byzantins de la collection Henri Seyrig [FAILLER, Albert. Jean-Claude Cheynet, Cécile Morrisson et Werner Seibt (Éd.), *Les sceaux byzantins de la Collection Henri Seyrig*. *Revue des études byzantines*, 1993, vol. 51, no 1.].

Méthodes : relations spatiales floues

Les connaissances sont modélisées de manière floue, avec **une approche morphologique [Bloch, 1999]**.

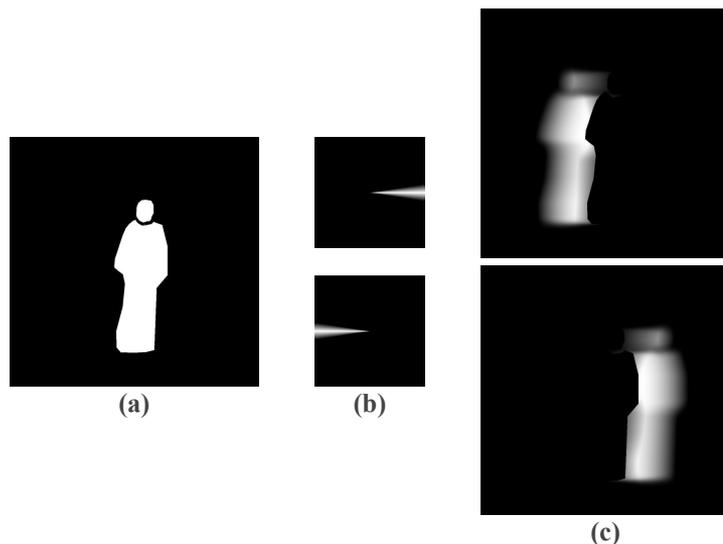


Figure : L'objet de référence (a). Les éléments structurants pour les relations << à gauche >> (b, en haut) et << à droite >> (b, en bas). Les paysages flous obtenus en dilatant l'objet de référence avec ces éléments structurants (c).

Méthodes : apprentissage profond intégrant des contraintes spatiales floues

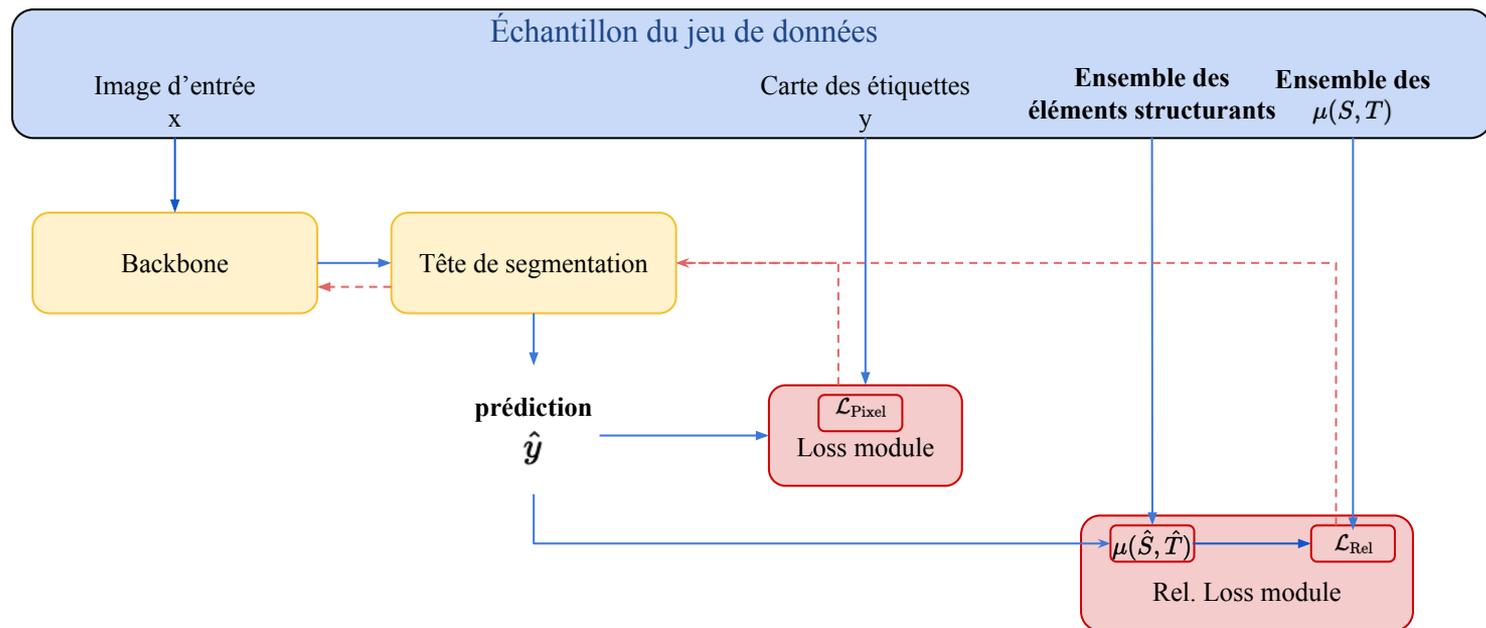
- S : objet de référence
- T : objet cible
- \hat{S}, \hat{T} : les prédictions correspondants
- $\mu(S, T)$: le score de la relation entre S et T
- R : liste des relations spatiales

- Nouvelle fonction de coût qui permet l'intégration de l'organisation spatiale dans un réseau neuronal pour la segmentation multi-objets :

$$\mathcal{L}_{\text{Rel}} = \frac{1}{|R|} \sum_{(S,T) \in R} |\mu(S, T) - \mu(\hat{S}, \hat{T})|$$

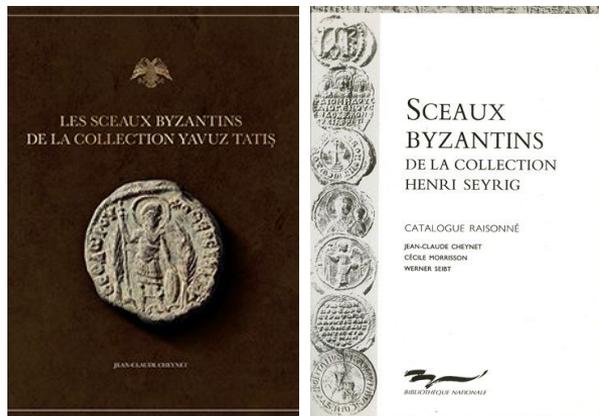
Méthodes : apprentissage profond intégrant des contraintes spatiales floues

Enrichissement du jeu de données et calcul du score des relations spatiales entre les objets prédits.



Application aux sceaux byzantins : jeu de données

{BnF



- Échantillonnage d'images de sceaux byzantins.
- Annotation d'images.
- Encodage des relations spatiales.

Figure : Les ressources de données: collections George Zacos et Henri Seyrig [FAILLER, Albert. Jean-Claude Cheynet, Cécile Morriison et Werner Seibt (Éd.), Les sceaux byzantins de la Collection Henri Seyrig. Revue des études byzantines, 1993, vol. 51, no 1.]; Les sceaux byzantins de la collection Yavuz Tatiş [TATIŞ, N. Yavuz; CHEYNET, Jean-Claude; PITARAKIS, Brigitte. Les sceaux byzantins de la collection Yavuz Tatiş. Publisher: ZeroBooks, 2019.].

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

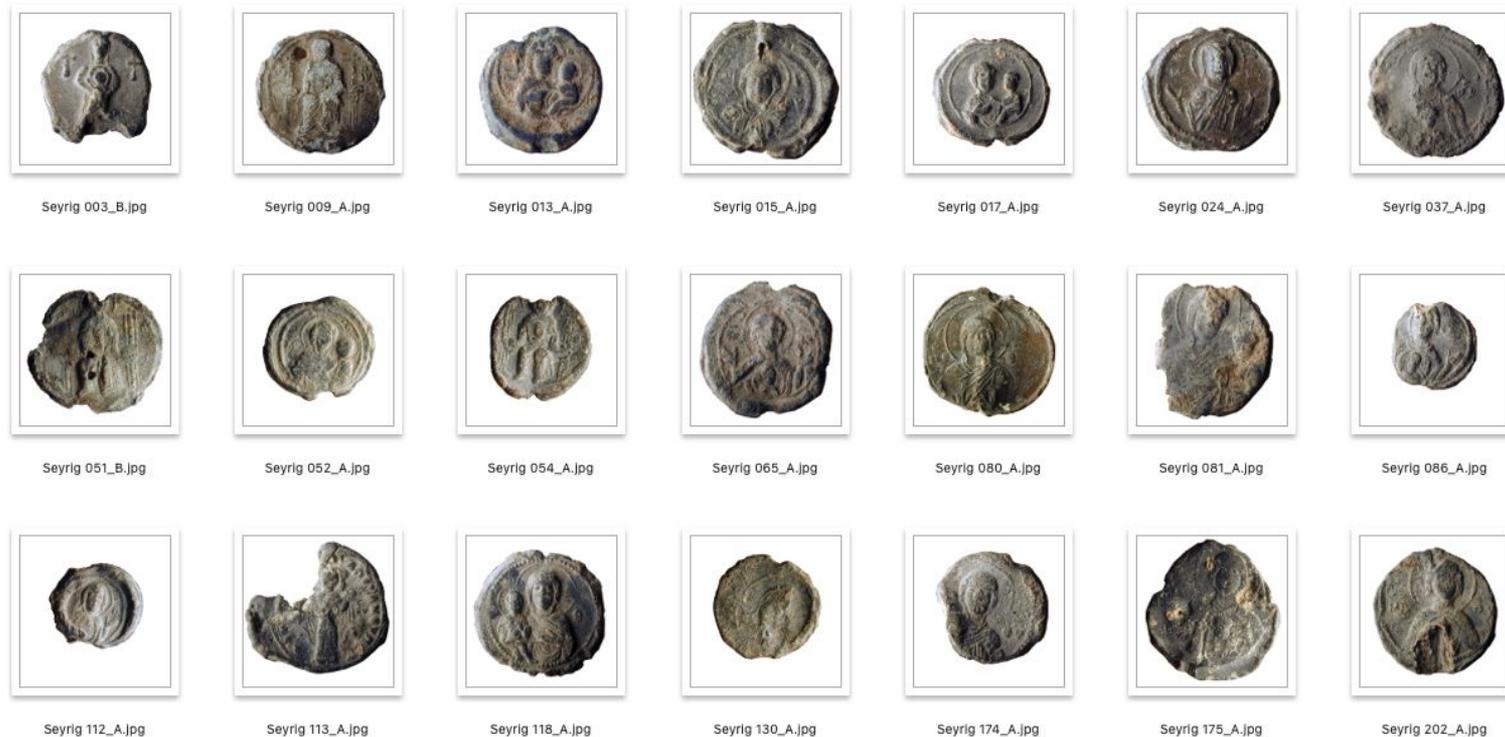


Figure : 108 images de sceaux représentant la Theotokos comme figure centrale sont sélectionnées.

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

8 classes : Théotokos, voile, nimbe, l'Enfant, nimbe crucifié, mains, trône, médaillon.



Figure : Annotation d'un sceau contenant une représentation de la **Théotokos** avec un **voile** et un **nimbe**, assise sur un **trône** et tenant le **médaille** de **l'Enfant**, accompagné de deux **mains** et son annotation (a), et un autre exemple contenant la **Théotokos** debout tenant **l'Enfant** portant un **nimbe crucifié** un sur son bras gauche. Les sceaux byzantins de la collection Henri Seyrig [FAILLER, Albert. Jean-Claude Cheynet, Cécile Morrisson et Werner Seibt (Éd.), Les sceaux byzantins de la Collection Henri Seyrig. Revue des études byzantines, 1993, vol. 51, no 1.].

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

Référence	Cible
Théotokos	Trône
Théotokos	Voile
Théotokos	Nimbe
Enfant	Nimbe crucifié
Enfant	Médaille
Théotokos	Enfant
Théotokos	Mains
Enfant	Mains

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

Les relations directionnelles sont considérées.



Figure : Exemples illustrant différentes configurations spatiales d'un objet **cible** par rapport à un objet de **référence**, ainsi que des éléments structurants conçus pour modéliser ces relations spatiales.

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

Les interactions spatiales complexes, telles que celles où s'opèrent la réunion de composantes ou de relations, sont gérées par l'agrégation floue des éléments structurants.

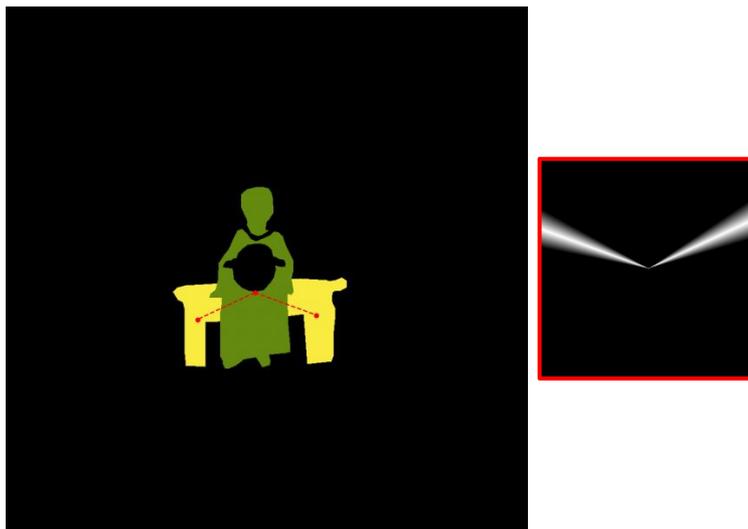


Figure : Un exemple montrant la relation entre un objet **cible** composé de deux composantes connexes et un objet de **référence**, ainsi qu'un élément structurant conçu pour modéliser la relation spatiale entre eux.

Application aux sceaux byzantins : jeu de données

On obtient un score en mesurant à quel point l'objet cible s'insère dans le paysage flou qui est dans la direction souhaitée par rapport à l'objet référence.

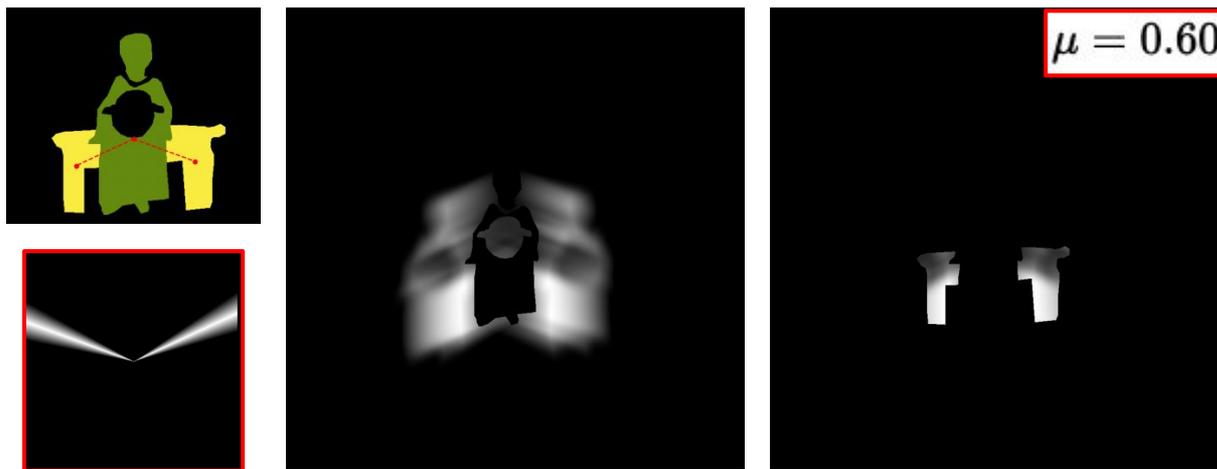


Figure : Un exemple montrant le paysage flou défini autour de l'objet de **référence** par dilatation, et la comparaison de l'objet **cible** avec ce paysage, permettant d'évaluer le degré de satisfaction de la relation traitée.

Application aux sceaux byzantins : protocole expérimental

- Validation croisée à 5 plis.
- DeepLabV3+ (backbone : ResNet101).
- $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{CE} + \alpha \mathcal{L}_{Rel}$, $\alpha \in [0, 0.2, 0.25, 0.33, 0.5, 0.75, 1, 1.25]$
- Descente de gradient stochastique.
- Taux d'apprentissage initial fixé à 0,01, diminué progressivement jusqu'à 0,0001 au cours de l'entraînement.
- La taille de lot : 2.
- 25000 itérations.
- GPU NVIDIA A100 Tensor Core avec CUDA 12.0.

TABLEAU 1 – Dice moyen (mD), précision moyenne (mP) et rappel moyen (mR). Les valeurs sont indiquées sous la forme moyenne \pm écart-type sur les 5 plis, pour différentes valeurs de α pondérant la fonction de coût proposée.

	0	0,2	0,25	0,33	0,5	0,75	1	1,25
mD	75 \pm 2,4	74,4 \pm 0,6	74,1 \pm 1,7	75,7 \pm 1,9	74,1 \pm 1,1	73,9 \pm 1,1	74,6 \pm 0,7	75,1 \pm 2,4
mP	79,8 \pm 0,9	78,7 \pm 1,3	79,5 \pm 2,5	80,1 \pm 1,3	79,5 \pm 1,6	79,6 \pm 1,1	78,5 \pm 1,3	80,4 \pm 1,9
mR	72,6 \pm 3,6	72,2 \pm 1,1	71,4 \pm 3,6	73,2 \pm 2,5	71,2 \pm 1,3	71 \pm 1,2	72,3 \pm 1,3	72,3 \pm 3,9

TABLEAU 2: Précision (P) et Rappel (R) pour chaque classe d'objet : trône (1), Théotokos (2), voile (3), nimbe (4), médaillon (5), Enfant (6), nimbe crucifié (7) et mains (8).

	0	0.2	0.25	0.33	0.75	1	1.25	
1	P	76.5 ± 5	69.6 ± 4.1	76 ± 11	76.6 ± 8.8	70 ± 7.1	73.1 ± 8.9	75.4 ± 9.4
	R	70.9 ± 19.1	68.1 ± 12.7	61.8 ± 11.4	66.1 ± 9.2	65 ± 12.9	66.6 ± 11.2	67.4 ± 18
2	P	80.2 ± 2.6	79.5 ± 2.1	82.3 ± 2	81.2 ± 2.3	79.4 ± 2.8	80.1 ± 3.2	80.3 ± 2.6
	R	87.6 ± 1.6	88.8 ± 1	85.7 ± 2.8	87.8 ± 2.2	88.1 ± 1	88 ± 1.1	88.8 ± 1.1
3	P	86 ± 2.2	85.8 ± 1	85.6 ± 1.8	86.2 ± 1.4	85.9 ± 1.6	85.8 ± 1.1	86.8 ± 1.1
	R	80.3 ± 3	80.7 ± 1.5	80.3 ± 3.4	79.7 ± 1.2	80.3 ± 2.1	80.8 ± 0.9	79.4 ± 2.2
4	P	77.1 ± 1.9	75.7 ± 2	76.8 ± 2.8	76.8 ± 1	76.4 ± 0.6	76.7 ± 1.3	76.4 ± 1.6
	R	70.1 ± 1.8	70.5 ± 1.2	67.5 ± 2.8	70 ± 1.2	68.3 ± 1.8	67.3 ± 2.2	69.4 ± 1.9
5	P	71.6 ± 1.8	72.4 ± 3.6	71.3 ± 4.3	72.7 ± 5.7	71.2 ± 3.9	71.9 ± 3.3	74 ± 2.6
	R	72.4 ± 7.9	74 ± 4	72.4 ± 4.8	75.7 ± 1.8	73.1 ± 3.4	74.5 ± 1.3	72.5 ± 2.9
6	P	83 ± 3.4	83.2 ± 4.2	81.6 ± 4.6	82.4 ± 3.1	83.8 ± 3.2	81.1 ± 4.5	82.7 ± 4.3
	R	76.4 ± 3.6	76.9 ± 1.5	79.8 ± 5.3	79.2 ± 4.7	75.8 ± 2	79 ± 2.3	76.1 ± 2.9
7	P	67.8 ± 6.2	65.1 ± 4.2	66.8 ± 8.7	69.3 ± 8.6	71.3 ± 3.6	61.2 ± 5	69.2 ± 6.4
	R	32.6 ± 9.3	30.2 ± 5.6	32.5 ± 11	34.9 ± 5.2	30.7 ± 4.9	34 ± 9.8	34 ± 8
8	P	78.2 ± 2.4	79.2 ± 1.9	77.6 ± 4	77.3 ± 2.7	80.3 ± 1.8	78.8 ± 2.2	81 ± 2.6
	R	64.9 ± 5.6	62.8 ± 3.2	64.6 ± 3	67.1 ± 3.5	59.3 ± 5.4	62.3 ± 2.8	65 ± 3.1

Résultats

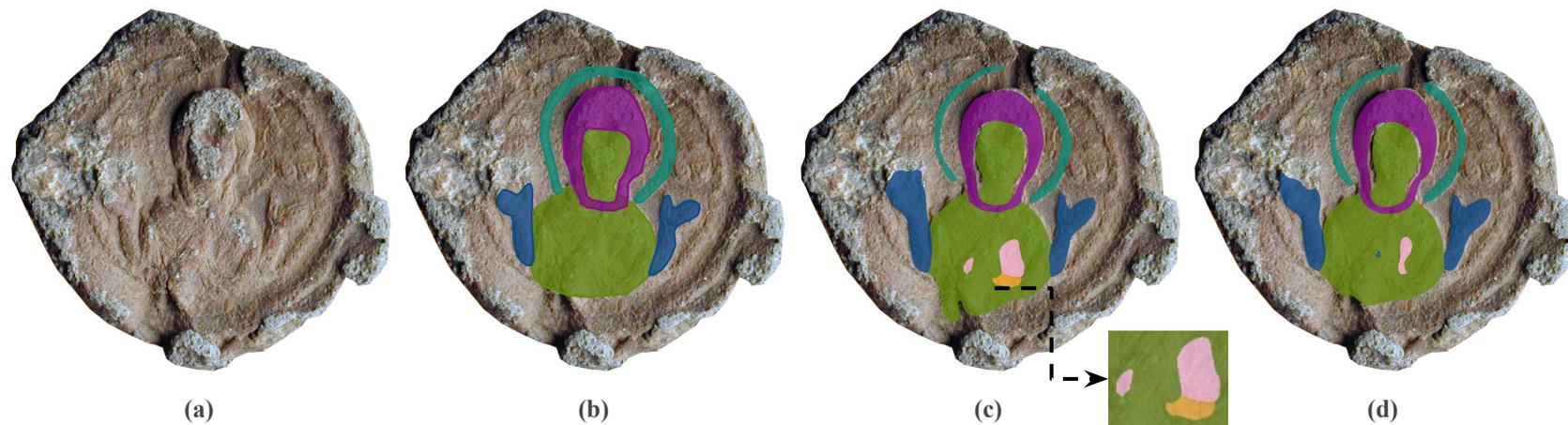


Figure : Image de sceaux (a) et images étiquetées (b) contenant les objets **Théotokos**, **voile**, **nimbe**, et **mains**. (c) Prédications du modèle avec une petite zone agrandie qui illustre la prédiction. (d) Résultats de l'approche proposée. Les sceaux byzantins de la collection Henri Seyrig [FAILLER, Albert. Jean-Claude Cheynet, Cécile Morriçon et Werner Seibt (Éd.), Les sceaux byzantins de la Collection Henri Seyrig. Revue des études byzantines, 1993, vol. 51, no 1.]

Résultats

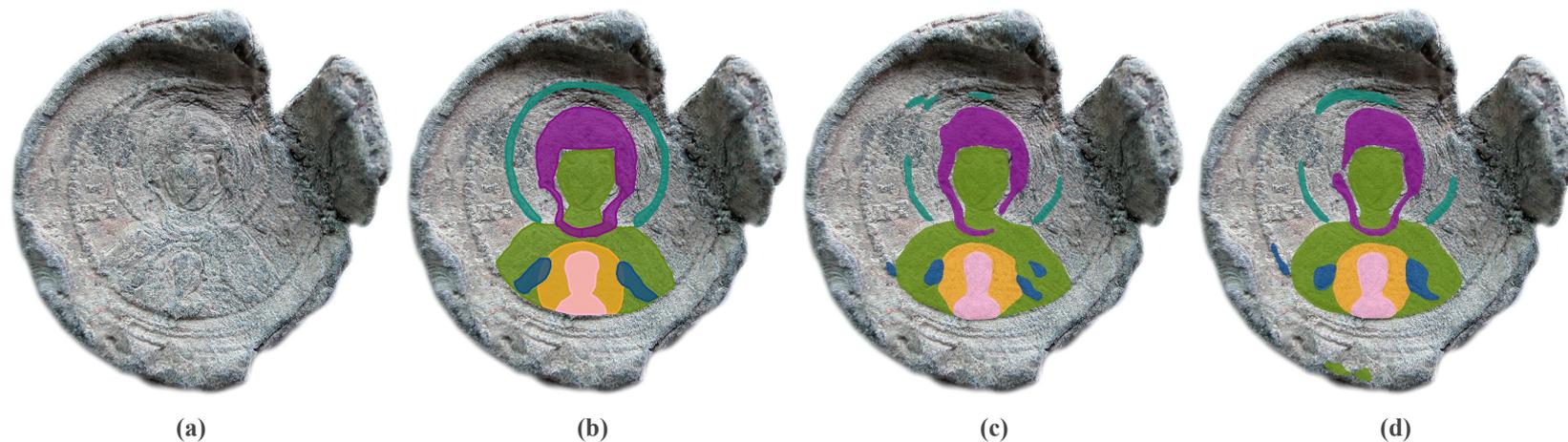


Figure : Image de sceaux (a) et images étiquetées (b) contenant les objets **Théotokos**, **voile**, **nimbe**, **mains**, **l'Enfant** et **médaille**. (c) Prédications du modèle. (d) Résultats de l'approche proposée. Les sceaux byzantins de la collection Yavuz Tatiş [TATIŞ, N. Yavuz; CHEYNET, Jean-Claude; PITARAKIS, Brigitte. Les sceaux byzantins de la collection Yavuz Tatiş. Publisher: ZeroBooks, 2019.].

Conclusion

- Approche d'intelligence artificielle hybride, combinant les connaissances sur les relations spatiales entre les objets et les informations extraites de photographies de sceaux byzantins.
- Nouvelle fonction de coût.
- Des résultats prometteurs :
 - l'identification améliorée des éléments iconographiques clés qui définissent des types spécifiques de scènes.
 - diminution des classes non pertinentes, conduisant à une interprétation sémantique plus cohérente et plus précise des scènes iconographiques.
- Perspectives :
 - Modélisation d'autres relations.
 - Renforcement du jeu d'entraînement.
 - Conception de mesures d'évaluation.
 - Expérimenter avec d'autres modèles.

Remerciements

- Ce travail a été partiellement financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), numéro de projet ANR-21-CE38-0001, <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE38-0001>.