

Émulation par IA d'un modèle de transfert radiatif dans la neige

Centre d'Études de la Neige

Adrien TORRENT

Encadré par Matthieu LAFAYSSSE, Léo VIALON GALINIER et Marie DUMONT

le 17 février 2026



Sommaire

1. Introduction : contexte et objectif

2. Jeu de données

3. Réseaux de neurones convolutifs

4. Architecture du modèle

5. Évaluation des performances

6. Perspectives et conclusion

1. Introduction

Contexte et enjeux



Col de Porte, massif de la Chartreuse

- **Pourquoi étudier le manteau neigeux ?**

Prévision du risque d'avalanches, gestion des ressources en eau

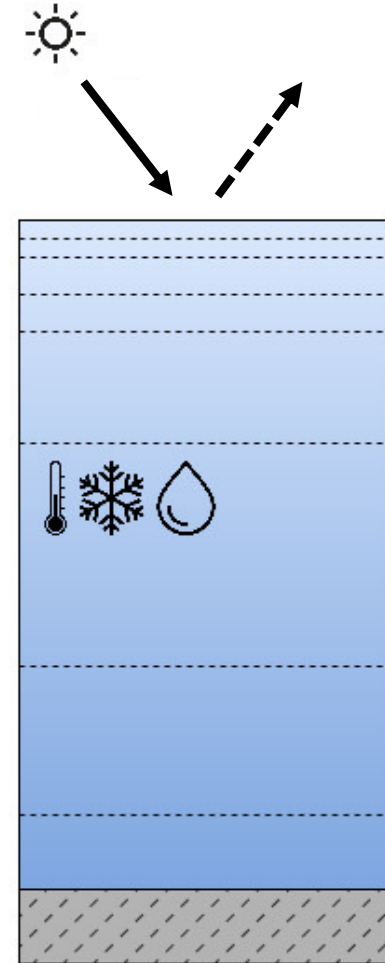
- **Utilisation de modèles numériques**

Forte variabilité spatiale et temporelle, observations in-situ insuffisantes

1. Introduction

Contexte et enjeux

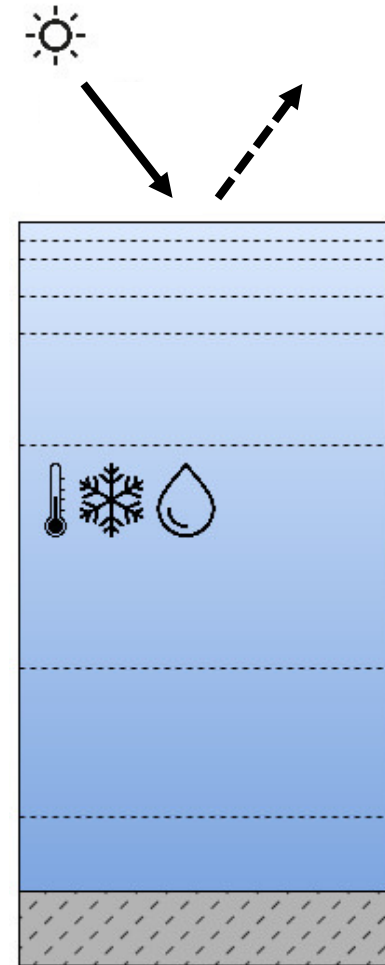
- Modèle de neige **Crocus** (*Brun et al, 1989 ; Lafaysse et al, 2025*)



1. Introduction

Contexte et enjeux

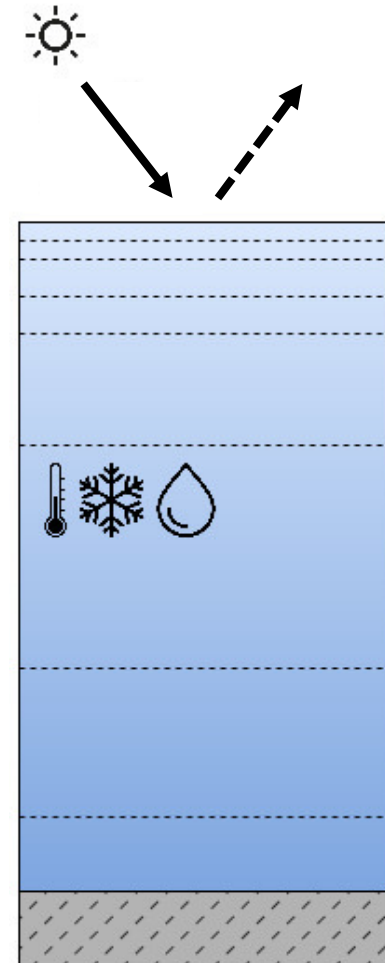
- Modèle de neige **Crocus** (*Brun et al, 1989 ; Lafaysse et al, 2025*)
- Calcul de l'albédo :
 - ❑ **Modèle à 3 bandes spectrales** (*Brun et al, 1989*)
1 bande visible et 2 bandes proche infrarouge
 - ❑ **Modèle TARTES** (*Charrois et al, 2016 ; Picard et Libois, 2024*)
Albédo spectral à une résolution de 20 nm
Angle zénithal solaire
Impuretés absorbantes (dust, black carbon)



1. Introduction

Contexte et enjeux

- Modèle de neige **Crocus** (*Brun et al, 1989 ; Lafaysse et al, 2025*)
- Calcul de l'albédo :
 - ❑ **Modèle à 3 bandes spectrales** (*Brun et al, 1989*)
1 bande visible et 2 bandes proche infrarouge
 - ❑ **Modèle TARTES** (*Charrois et al, 2016 ; Picard et Libois, 2024*)
Albédo spectral à une résolution de 20 nm
Angle zénithal solaire
Impuretés absorbantes (dust, black carbon)
- **Problématique**
Coût de calcul : $\times 8$ à $\times 10$ (*Lafaysse et al, 2025*)



1. Introduction

Objectif

Émuler le modèle TARTES pour réduire le coût de calcul.

- **Travaux existants**

Méthode VALHALLA (*Veillon et al, 2021*)

Réduction de la résolution spectrale + interpolation

- **Approche retenue : Deep Learning**

Résultats récents sur un modèle de transfert radiatif simplifié (*Chevrollier, 2025*)

- **Enjeu**

Nombre de couches de neige variable (jusqu'à 50)

- **Réduction du problème**

Se limiter à l'albédo broadband (intégré sur l'ensemble du spectre solaire)

2. Données

■ Entrées et sorties du modèle

Les simulations ont été réalisées avec la version 3.0 du modèle Crocus (*Lafaysse et al, 2025*), en activant le module TARTES (*Picard et Libois, 2024*).

Les forcages sont décrits dans (*Vernay et al, 2022*) et (*Réveillet et al, 2022*).

Paramètres	Description	Unité
Inputs		
$\Delta z(l)$	Épaisseur de la couche de neige	m
$SSA(l)$	Surface spécifique*	m^2kg^{-1}
$\rho(l)$	Densité	kgm^{-3}
$c_{soot}(l)$	Concentration en suie	$kgkg^{-1}$
$c_{dust}(l)$	Concentration en poussière	$kgkg^{-1}$
SW_{direct}	Rayonnement solaire direct	Wm^{-2}
$SW_{diffuse}$	Rayonnement solaire diffus	Wm^{-2}
θ_{zenith}	Angle zénithal solaire**	rad
Outputs		
α	Albedo broadband	-

Les paramètres marqués d'un (l) sont donnés pour chaque couche de neige.

* Mesure de la surface de l'interface entre la neige et l'air.

** Calculé à partir de la longitude, la latitude, la pente et l'orientation.

2. Données

■ Entrées et sorties du modèle

Les simulations ont été réalisées avec la version 3.0 du modèle Crocus (*Lafaysse et al, 2025*), en activant le module TARTES (*Picard et Libois, 2024*).

Les forcages sont décrits dans (*Vernay et al, 2022*) et (*Réveillet et al, 2022*).

■ Gestion de la dimension variable

Ajout d'un vecteur binaire, indiquant pour chaque niveau la présence d'une couche de neige.

■ Filtrage des valeurs

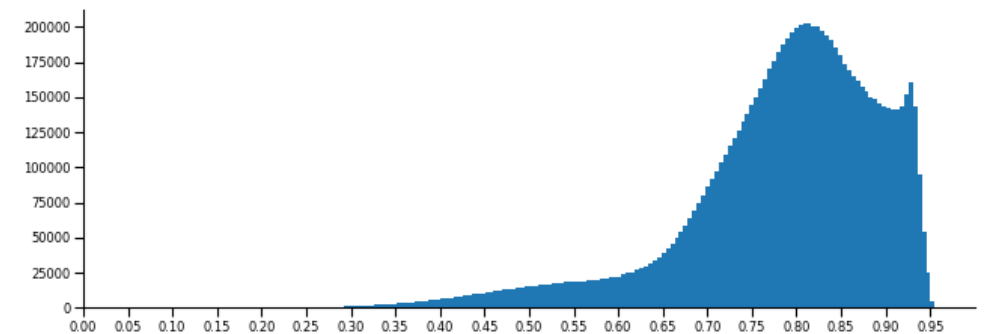
- Absence de neige
- Albédo nocturne

Paramètres	Description	Unité
Inputs		
$\Delta z(l)$	Épaisseur de la couche de neige	m
$SSA(l)$	Surface spécifique*	m^2kg^{-1}
$\rho(l)$	Densité	kgm^{-3}
$c_{soot}(l)$	Concentration en suie	$kgkg^{-1}$
$c_{dust}(l)$	Concentration en poussière	$kgkg^{-1}$
SW_{direct}	Rayonnement solaire direct	Wm^{-2}
$SW_{diffuse}$	Rayonnement solaire diffus	Wm^{-2}
θ_{zenith}	Angle zénithal solaire**	rad
Outputs		
α	Albedo broadband	-

Les paramètres marqués d'un (l) sont donnés pour chaque couche de neige.

* Mesure de la surface de l'interface entre la neige et l'air.

** Calculé à partir de la longitude, la latitude, la pente et l'orientation.



Distribution de l'albédo broadband, après filtrage des valeurs, sur la période d'août 1979 à août 1980 dans l'ensemble des massifs des Alpes françaises.

2. Données

■ Entrées et sorties du modèle

Les simulations ont été réalisées avec la version 3.0 du modèle Crocus (*Lafaysse et al, 2025*), en activant le module TARTES (*Picard et Libois, 2024*).

Les forcages sont décrits dans (*Vernay et al, 2022*) et (*Réveillet et al, 2022*).

■ Gestion de la dimension variable

Ajout d'un vecteur binaire, indiquant pour chaque niveau la présence d'une couche de neige.

■ Filtrage des valeurs

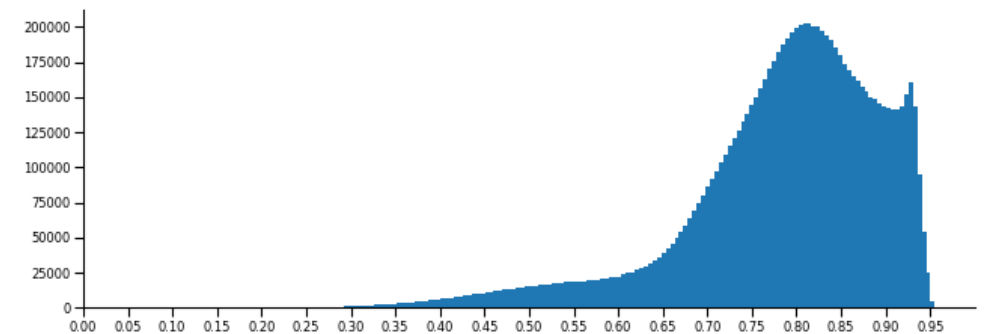
- Absence de neige
- Albédo nocturne

Paramètres	Description	Unité
Inputs		
$\Delta z(l)$	Épaisseur de la couche de neige	m
$SSA(l)$	Surface spécifique*	m^2kg^{-1}
$\rho(l)$	Densité	kgm^{-3}
$c_{soot}(l)$	Concentration en suie	$kgkg^{-1}$
$c_{dust}(l)$	Concentration en poussière	$kgkg^{-1}$
	+ Présence de la couche de neige	
SW_{direct}	Rayonnement solaire direct	Wm^{-2}
$SW_{diffuse}$	Rayonnement solaire diffus	Wm^{-2}
θ_{zenith}	Angle zénithal solaire**	rad
Outputs		
α	Albedo broadband	-

Les paramètres marqués d'un (l) sont donnés pour chaque couche de neige.

* Mesure de la surface de l'interface entre la neige et l'air.

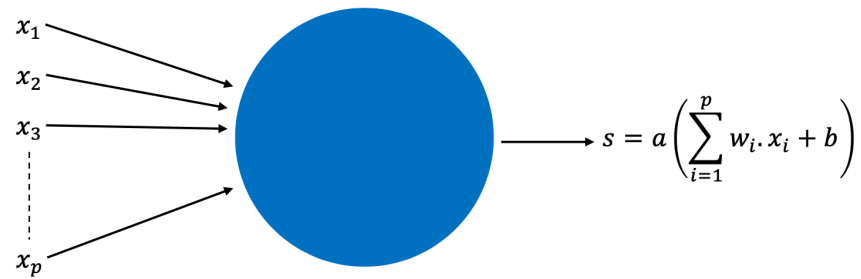
** Calculé à partir de la longitude, la latitude, la pente et l'orientation.



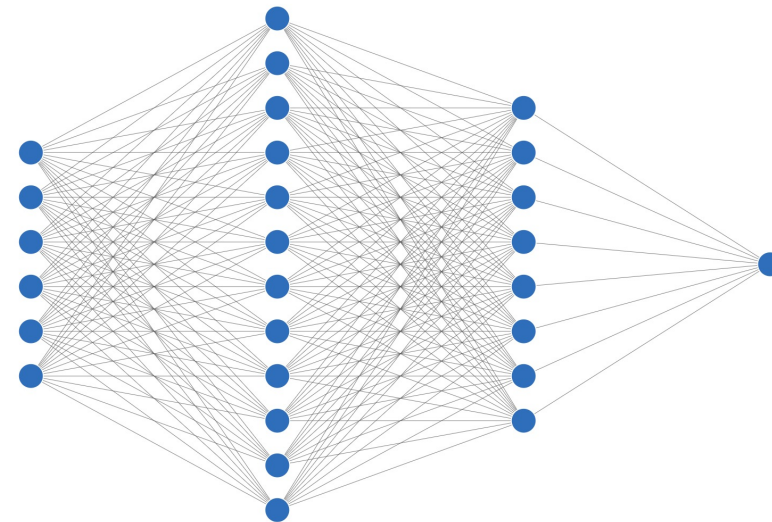
Distribution de l'albédo broadband, après filtrage des valeurs, sur la période d'août 1979 à août 1980 dans l'ensemble des massifs des Alpes françaises.

3. Réseaux de neurones convolutifs

Réseaux de neurones



Le neurone élémentaire



Un réseau de neurone

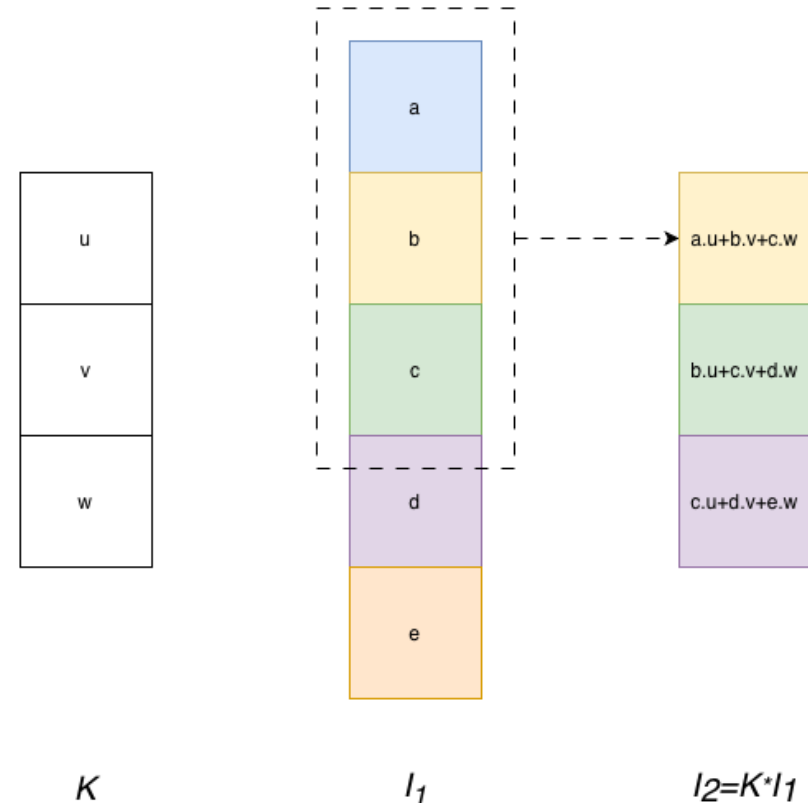
3. Réseaux de neurones convolutifs

Convolutions

- Ajout de couches supplémentaires en amont du réseau de neurones dense
- Traitement de données spatiales (images)

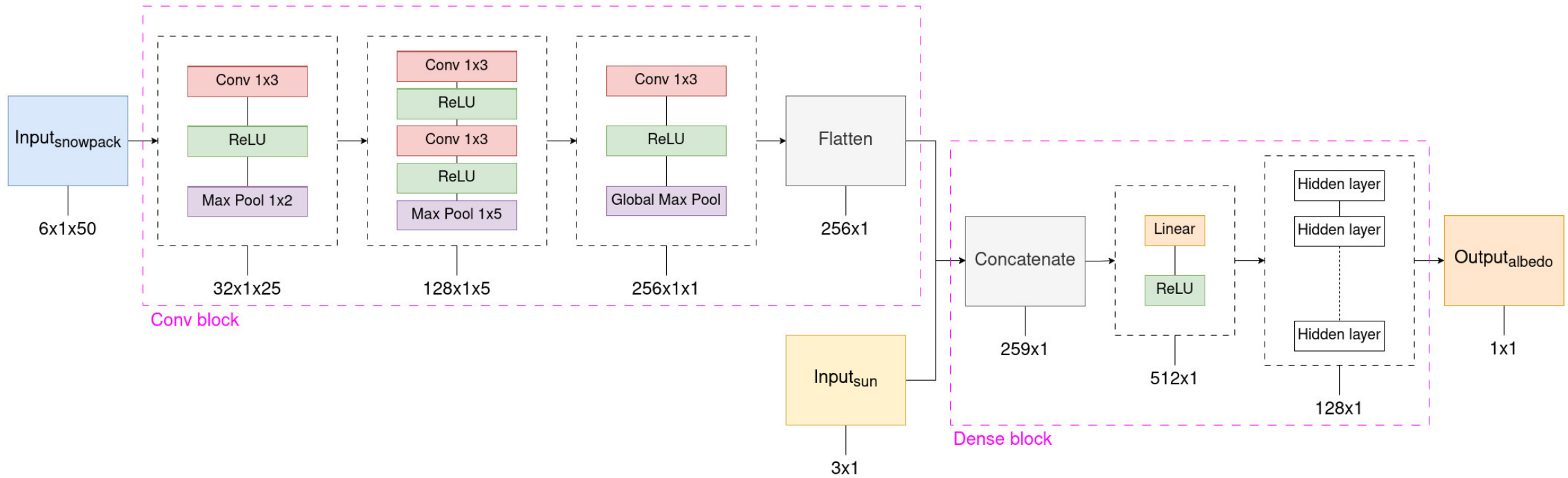
Convolutions 1D : Extraction de motifs locaux le long du profil vertical.

Pooling : Réduction de la dimension.



Convolution d'une image 1D I_1 par un noyau K

4. Architecture du modèle



Architecture du modèle CNN

5. Résultats

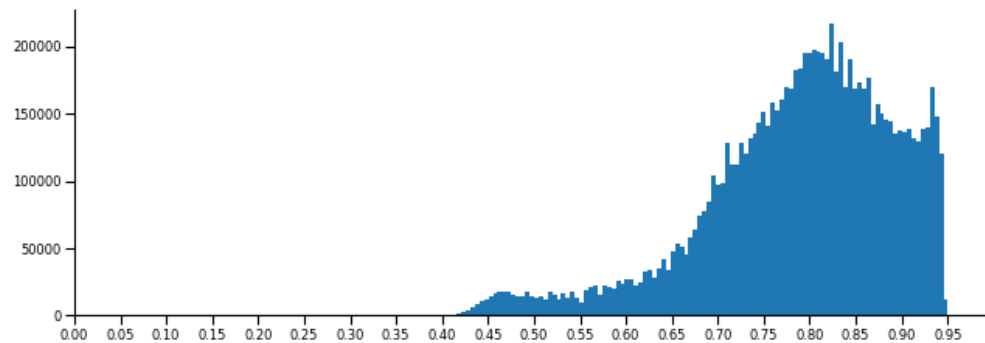
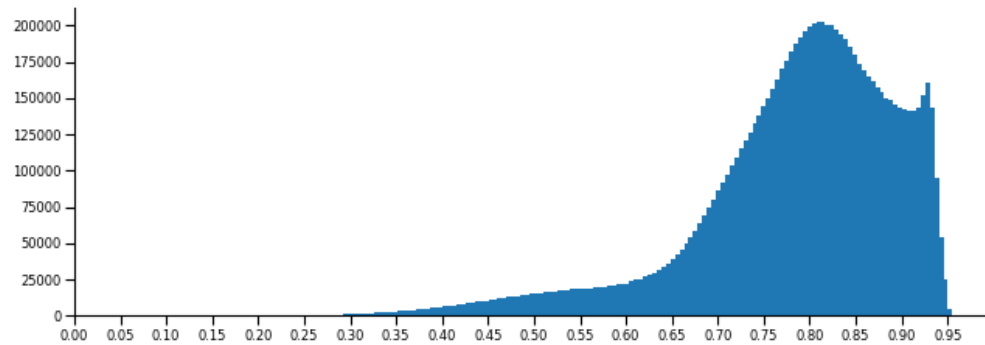
Performances globales

- Les évaluations suivantes ont été réalisées sur un jeu de données indépendant (Alpes, 1979-1980).
- **RMSE : 0.024**

5. Résultats

Performances globales

- Les évaluations suivantes ont été réalisées sur un jeu de données indépendant (Alpes, 1979-1980).
- **RMSE : 0.024**

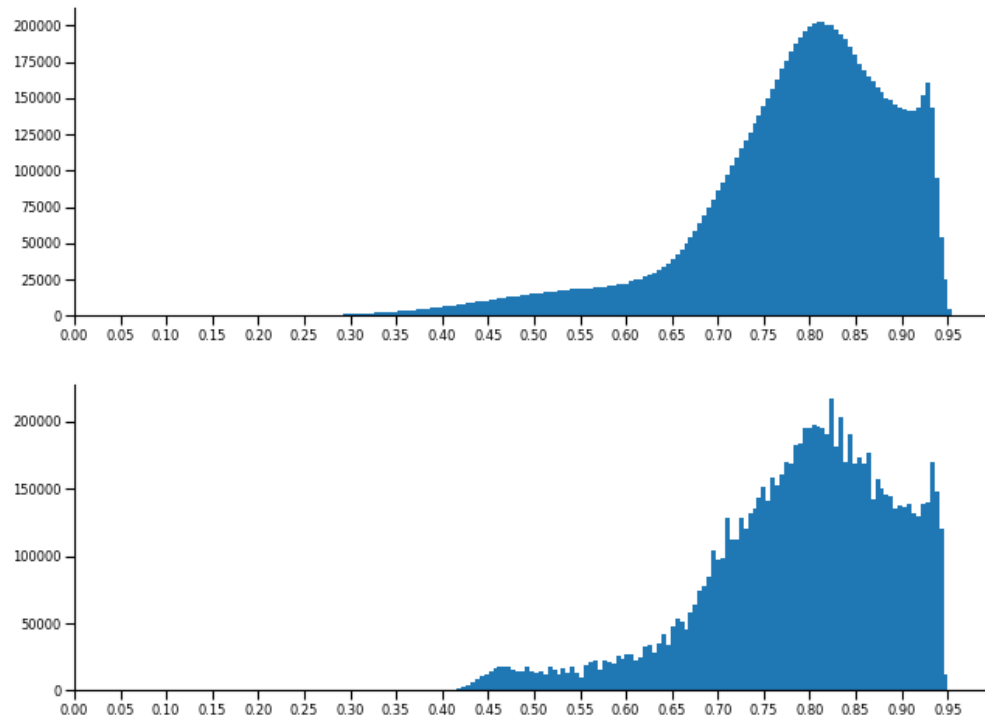


Distribution de l'albédo broadband

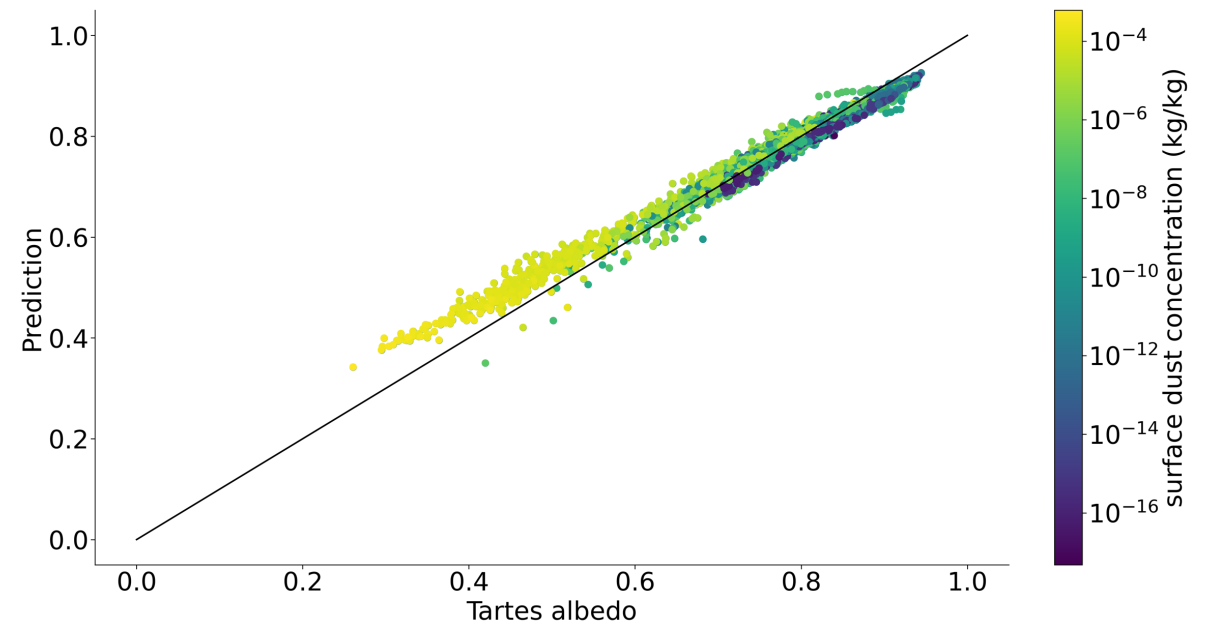
5. Résultats

Performances globales

- Les évaluations suivantes ont été réalisées sur un jeu de données indépendant (Alpes, 1979-1980).
- RMSE : 0.024**



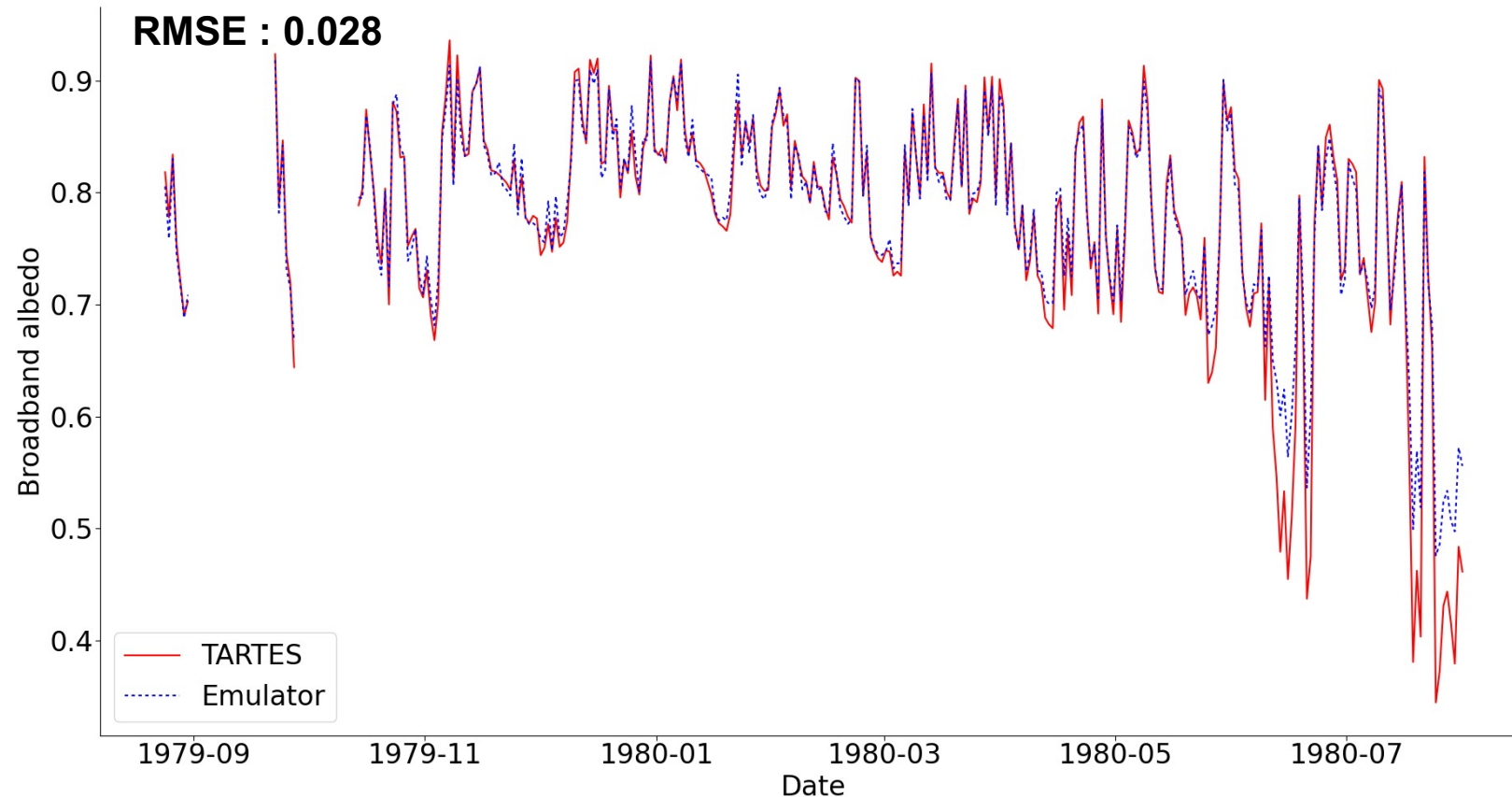
Distribution de l'albédo broadband



Prédictions du modèle CNN en fonction des albédo calculés par TARTES. L'échelle de couleur représente la concentration en impuretés minérales sur la couche de surface.

5. Résultats

Profils saisonniers

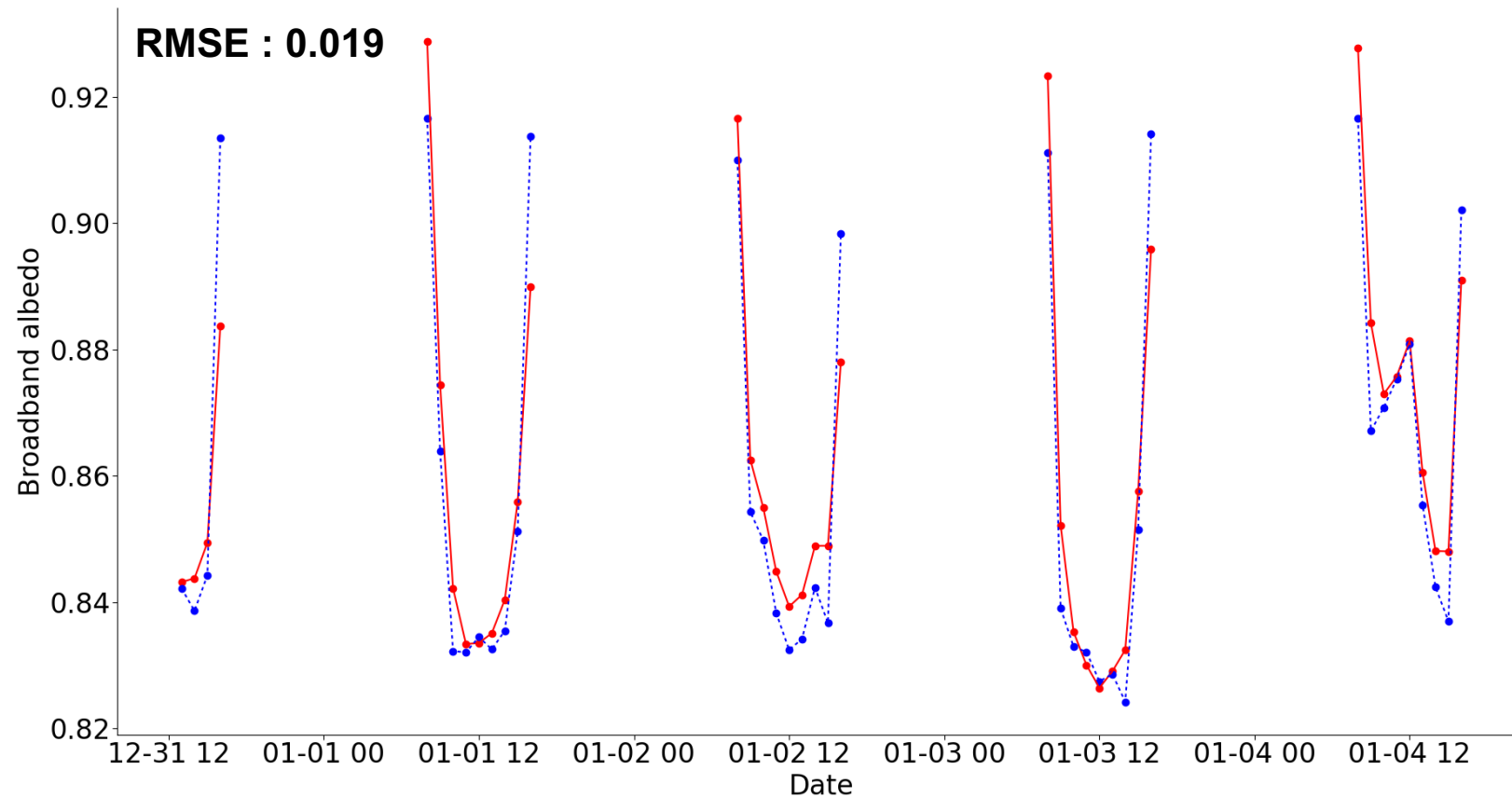


- Surestimation des valeurs < 0.6
- + d'erreurs en **fin de saison**

Évolution de l'albédo broadband à 12h au cours de la saison 1979-1980, pour un point situé dans le massif du Mont-Blanc. Altitude : 2700m, pente : 0°.

5. Résultats

Profils journaliers



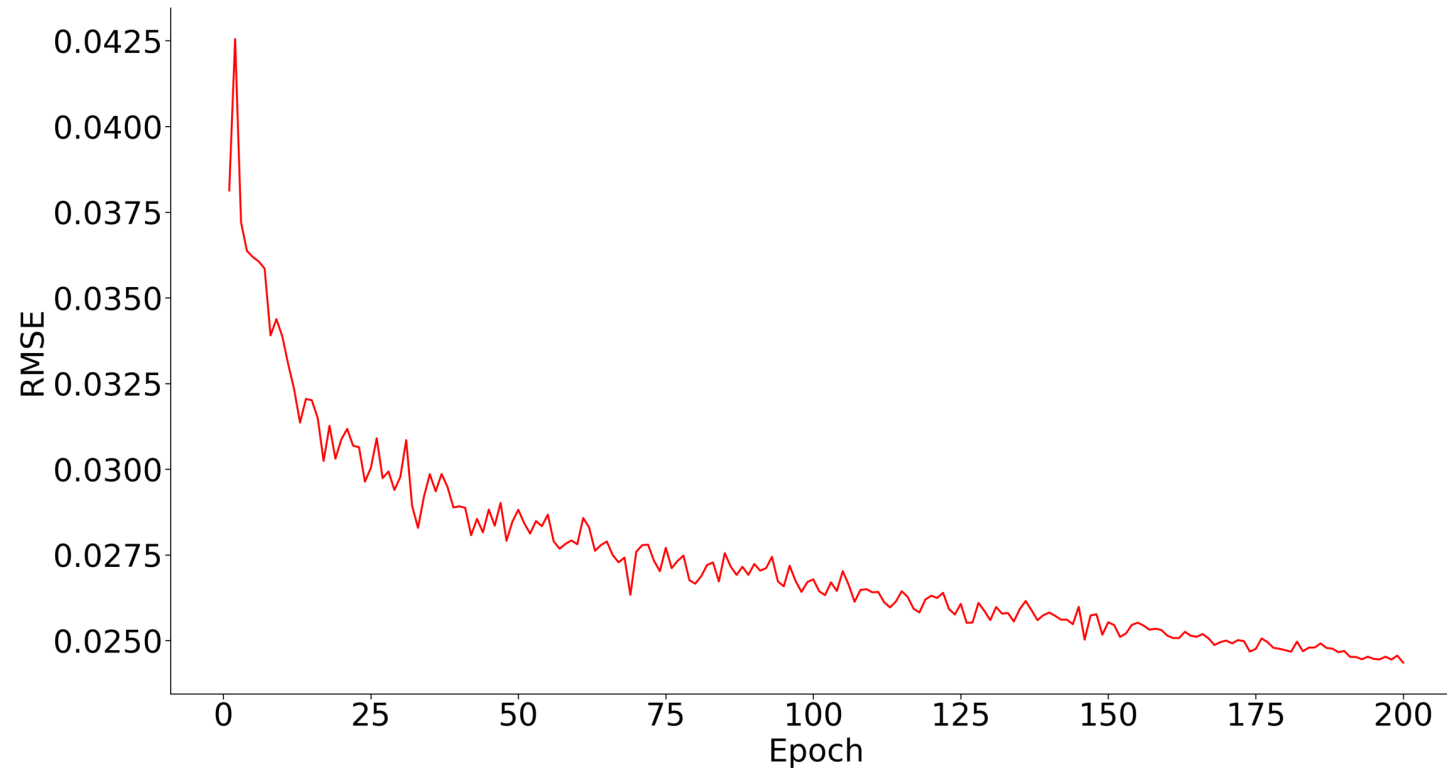
- Surestimation des valeurs en fin de journée
- **Influence du nombre d'epochs** sur la restitution du cycle diurne

Cycle journalier de l'albédo broadband pour un point situé dans le massif du Mont-Blanc.

6. Perspectives

RMSE finale : $2.4 \cdot 10^{-2}$

Référence de RMSE : $9.2 \cdot 10^{-5}$ (*Chevrollier, 2025*)



- Poursuivre l'apprentissage (fin du stage)
- Réduire le nombre de couches de neige considérées (*Fukami et al, 2017*)

Évolution de l'erreur quadratique sur le jeu de données d'évaluation.

7. Conclusion

Objectif : Émuler le modèle TARTES

➤ Réseaux de neurones convolutifs

➤ Résultats prometteurs

➤ Écarts en fin de saison

➤ **Réduction du coût de calcul**

TARTES ~ 7h

CNN ~ 2min

Références

- E. Brun, E. Martin, V. Simon, C. Gendre, and C. Coleou, “An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting,” *Journal of Glaciology*, vol. 35, no. 121, 1989.
- M. Lafaysse, M. Dumont, B. De Fleurian, R. Fructus, M. and Nheili, L. Viallon-Galinier, M. Baron, A. Boone, A. Bouchet, J. Brondex, C. Carmagnola, B. Cluzet, K. Fourteau, A. Haddjeri, P. Hagenmuller, G. Mazzotti, M. Minvielle, S. Morin, L. Quéno, L. Roussel, P. Spandre, F. Tuzet, and V. Vionnet, “Version 3.0 of the crocus snowpack model,” *EGUsphere [preprint]*, 2025.
- L. Charrois, E. Cosme, M. Dumont, M. Lafaysse, S. Morin, Q. Libois, and G. Picard, “On the assimilation of optical reflectances and snow depth observations into a detailed snowpack model,” *The Cryosphere*, vol. 10, no. 3, pp. 1021-1038, May 2016.
- G. Picard and Q. Libois, “Simulation of snow albedo and solar irradiance profile with the two-stream radiative transfer in snow (tartes) v2.0 model,” *The EGUsphere*, June 2024.
- F. Veillon, C. Amory, M. Dumont, and M. Fructus, “A versatile method for computing optimized snow albedo from spectrally fixed radiative variables : Valhalla v1.0,” *Geoscientific Model Development*, vol. 14, no. 12, pp. 7329-7343, 2021.
- L.-A. Chevrollier, A. Wehrlé, J. M. Cook, N. Pirk, L. G. Benning, A. M. Anesio, and M. Tranter, “Separating the albedo-reducing effect of different light absorbing particles on snow using deep learning,” *The Cryosphere*, vol. 19, pp. 1527-1538, 2025.
- M. Vernay, M. Lafaysse, D. Monteiro, P. Hagenmuller, R. Nheili, R. Samacoïts, D. Verfaillie, and S. Morin, “The s2m meteorological and snow cover reanalysis over the french mountainous areas : description and evaluation (1958–2021),” *Earth System Science Data*, vol. 14, 2022.
- M. Réveillet, M. Dumont, S. Gascoin, M. Lafaysse, P. Nabat, A. Ribes, R. Nheili, F. Tuzet, M. Ménégoz, S. Morin, G. Picard, and P. Ginoux, “Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change,” *Nature Communications*, vol. 13, p. 5279, 2022.
- H. Fukami, K. Kojima, and H. Aburakawa, “The extinction and absorption of solar radiation within a snow cover,” *Annals of Glaciology*, vol. 6, pp. 118-122, 2017.