



Les variables d'état des modèles de neige

Matthieu Lafaysse et Marie Dumont

Plan

- Variables pour caractériser la neige dans un modèle de neige
 - Types de modèles de neige / discrétisation
 - Liste des variables d'état
 - Evolution des variables d'état
 - Variables diagnostiques
- Confrontation avec les observations :
 - Diagnostics
 - Variables d'état
- Conclusions : Contraintes pour les évolutions futures

Types de modèle / discrétisation

Physical process

State variable

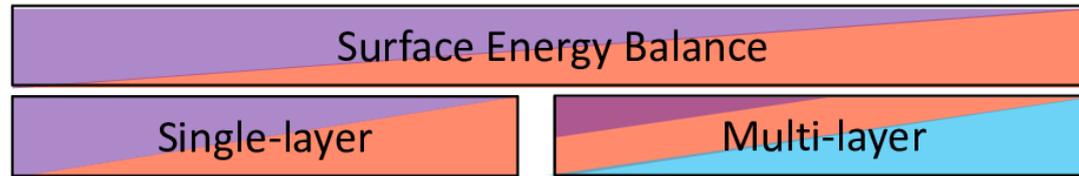
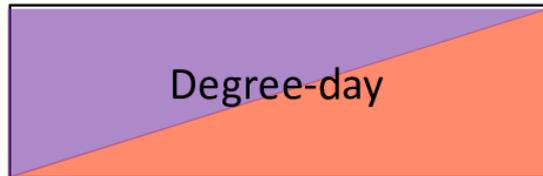
Input variable

Hydrological applications

Climate studies applications

Avalanche forecast

Model complexity



Snow accumulation/melt
 Snow mass
Temperature, Precip

**Snowmelt, Accumulation, Heat diffusion,
 Phase change (Sublimation, Refreezing), Liquid water flow**
 Snow density, Snow mass, Liquid water fraction,
 Snow temperature, (Snow age)
*Temperature, Precip phase, Wind, Pressure, SWdown,
 LWdown*

**Composite snow-soil:
 Snow-soil energy balance**

**Surface energy balance
 Solar radiation transmission
 Percolation
 Snow compaction
 Snow grain size**

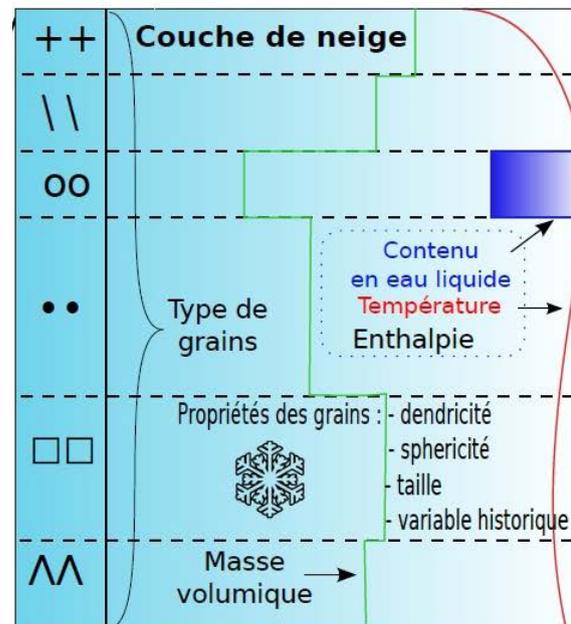
**Explicit single snow layer
 Surface energy balance**

**Detailed models :
 Snow metamorphism
 Snow microstructure**

Largerion et al, in prep

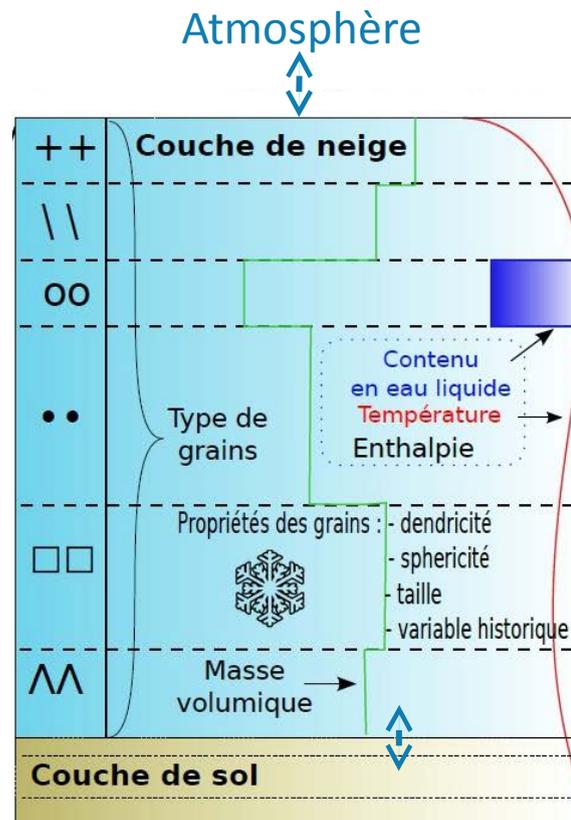
Types de modèles de neige / discrétisation

- Concepts des modèles multi-couches :
 - Représenter la neige au sol comme un **milieu stratifié** avec des variables d'état pour chaque couche numérique



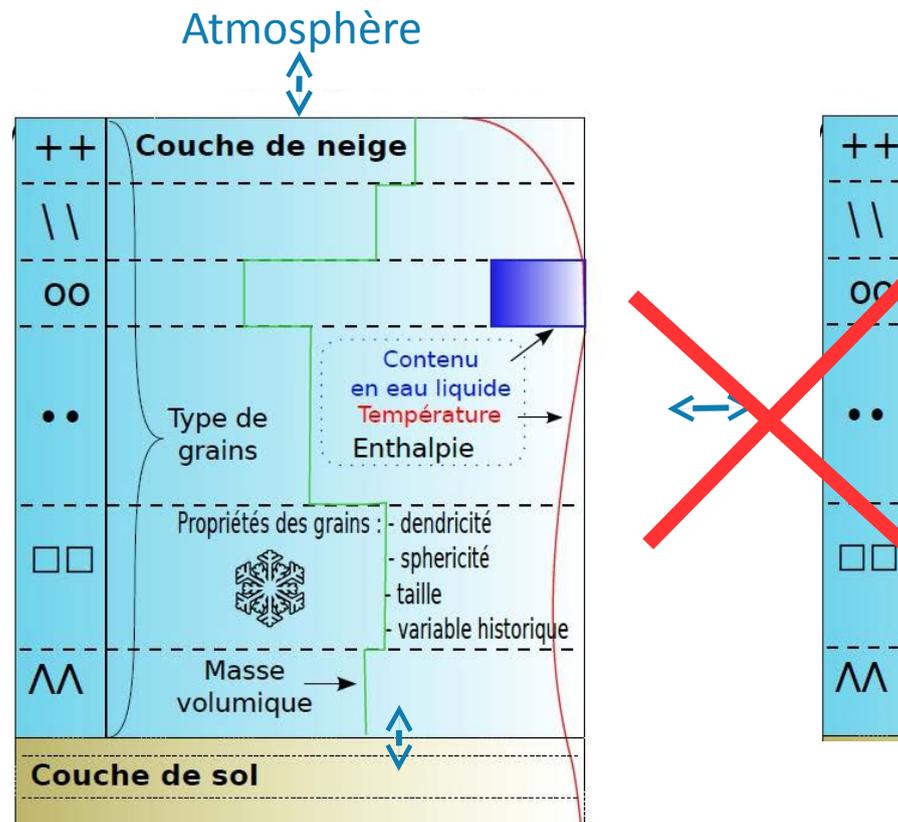
Types de modèles de neige / discrétisation

- Concepts des modèles multi-couches :
 - Représenter la neige au sol comme un **milieu stratifié** avec des variables d'état pour chaque couche numérique
 - Représenter l'évolution de ces couches de neige en fonction des **échanges d'énergie et de masse** aux limites

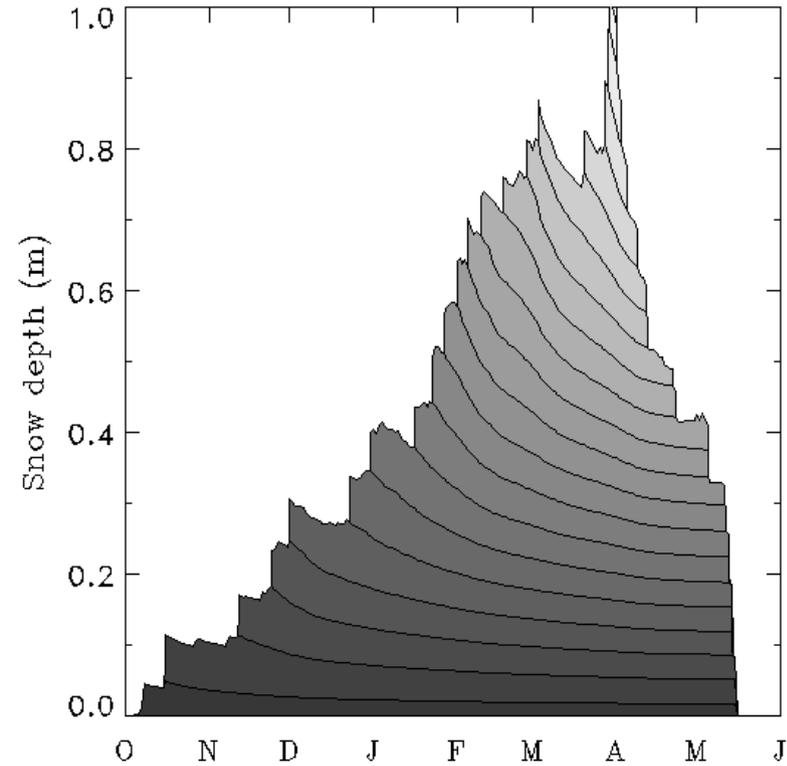
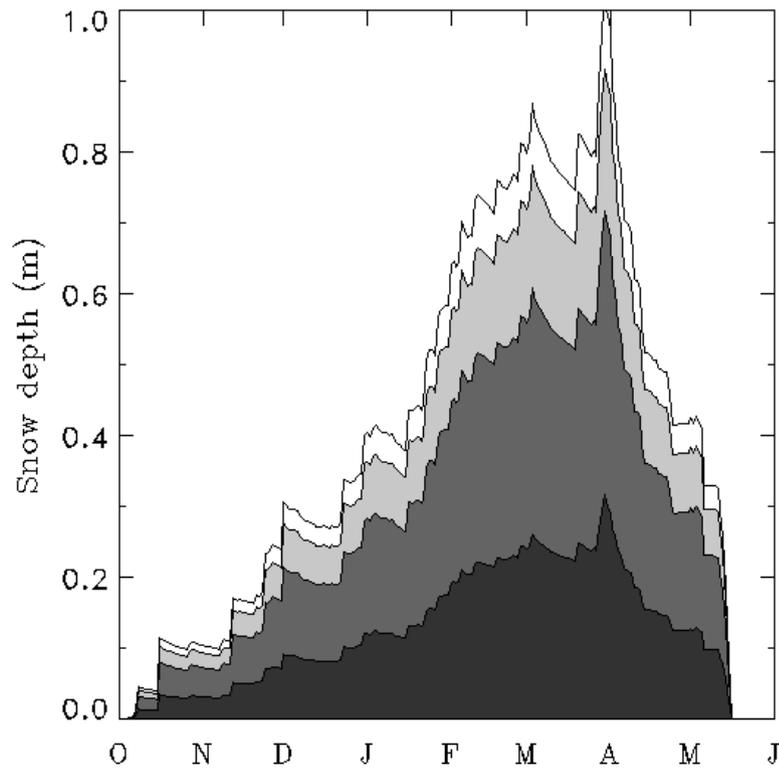


Types de modèles de neige / discrétisation

- Concepts des modèles multi-couches :
 - Représenter la neige au sol comme un **milieu stratifié** avec des variables d'état pour chaque couche numérique
 - Représenter l'évolution de ces couches de neige en fonction des **échanges d'énergie et de masse** aux limites
 - Ignorer la variabilité horizontale et les transferts latéraux (**modèle 1D**)



Types de modèle de neige / discrétisation



Discrétisation **eulérienne** :

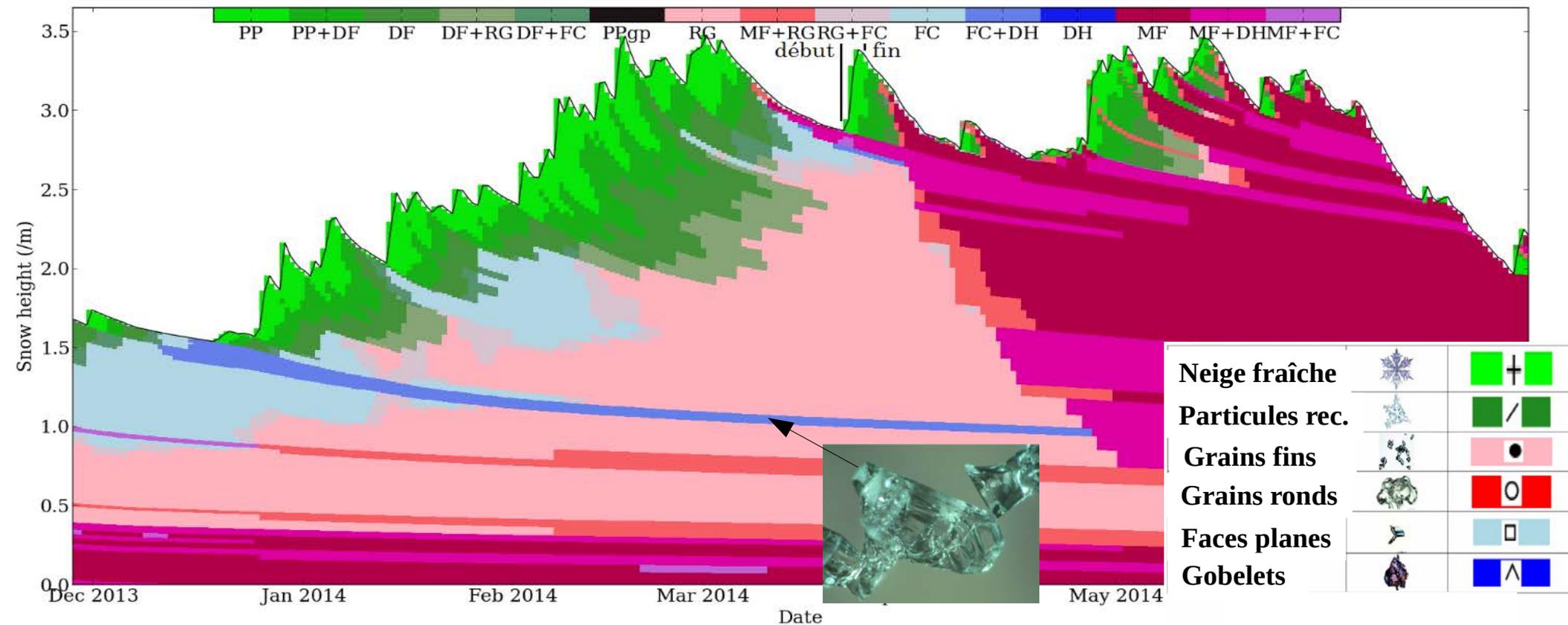
- permet de fixer et réduire le nombre de couches
- Choix classique pour les modèles de climat ou d'hydrologie

Discrétisation **lagrangienne** :

- mieux adaptée au suivi de l'**historique des couches**
- Nécessaire pour caractériser la stabilité mécanique (application avalanches)
- Généralement associée à un jeu plus complet de variables d'état (**microstructure**)

Types de modèle neige / discrétisation

- Crocus : discrétisation **lagrangienne**, maximum de **50 couches** de neige
- **Dédoublage** ou **aggrégation** de couches en évitant de mélanger des couches dont les propriétés physiques sont trop différentes
 - Permet de représenter des couches fines persistantes ayant une influence sur la stabilité
 - Discrétisation plus fine près de la surface



Liste des variables d'état

- Variables d'état caractérisant une couche de neige dans la discrétisation choisie :

| | Modèles intermédiaires | Crocus | SNOWPACK |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------|---|
| Masse | X | X | X |
| Densité | X | X | X |
| Température | X | X | X |
| Contenu en eau liquide | Dans certains cas | X | X |
| Age | | X | X |
| Microstructure | Dans certains cas taille de grains | SSA Sphéricité | Dendricité Sphéricité Taille des grains Taille des ponts |
| Masse d'impuretés absorbantes | | Optionnel (BC, dust) | |
| Contenu en vapeur d'eau | | | |

Liste des variables d'état

- Variables d'état caractérisant une couche de neige dans la discrétisation choisie :

| | Modèles intermédiaires | Crocus | SNOWPACK |
|-------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Masse | X | X | X |
| Densité | X | X | X |
| Température | X | X | X |
| Contenu en eau liquide | Dans certains cas | X | X |
| Age | | X | X |
| Microstructure | Dans certains cas taille de grains | SSA Sphéricité Non observable | Dendricité Sphéricité Taille des grains Taille des ponts |
| Masse d'impuretés absorbantes | | Optionnel (BC, dust) | |
| Contenu en vapeur d'eau | | | |

Evolution des variables d'état

- Evolution **température** et **masse**, changements de phase :
Résolution de l'**équation de diffusion de la chaleur** dans le manteau neigeux stratifié (1D) au pas de temps de **15 minutes** :

Variation de température en 15 minutes

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho(i) C_p(i) dz(i) T(i) + L_f W(i)) =$$

$$\begin{cases} Q_c(i) + L_f W_p + S_{abs}(i) + L_{net} + H + LE + P & \text{(surface)} \\ Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i) & \text{(internal layer)} \\ Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i) + Q_g & \text{(basal layer)} \end{cases}$$

Changement de phase si T = 0°C
Flux turbulents
Rayonnement infrarouge
Conduction dans la neige
Percolation d'eau liquide
Rayonnement solaire absorbé
Conduction sol-neige

Equation d'évolution pour chaque couche de neige

Evolution des variables d'état

- Evolution **température** et **masse**, changements de phase :
Résolution de l'**équation de diffusion de la chaleur** dans le manteau neigeux stratifié (1D) au pas de temps de **15 minutes** :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho(i) C_p(i) dz(i) T(i) + L_f W(i)) =$$

| | | |
|---|--|------------------|
| { | $Q_c(i) + L_f W_p + S_{abs}(i) + L_{net} + H + LE + P$ | (surface) |
| { | $Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i)$ | (internal layer) |
| { | $Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i) + Q_g$ | (basal layer) |

Tous les termes entourés font intervenir la température des couches de neige.

Résolution implicite → exprimés en fonction de la température en fin de pas de temps

Evolution des variables d'état

- Evolution **température** et **masse**, changements de phase :
Résolution de l'**équation de diffusion de la chaleur** dans le manteau neigeux stratifié (1D) au pas de temps de **15 minutes** :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho(i) C_p(i) dz(i) T(i) + L_f w(i)) =$$

| | |
|--|------------------|
| $Q_c(i) + L_f W_p + S_{abs}(i) + L_{net} + H + LE + P$ | (surface) |
| $Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i)$ | (internal layer) |
| $Q_c(i) + L_f W + S_{abs}(i) + Q_g$ | (basal layer) |

Les termes entourés font intervenir des paramètres reposant sur des **paramétrisations empiriques**.

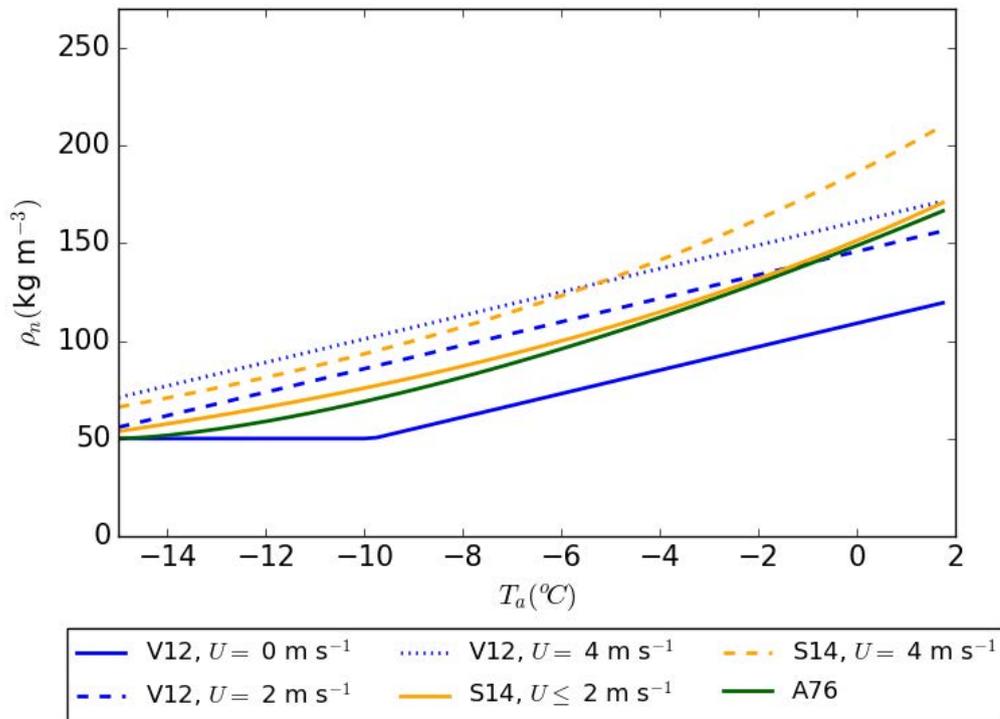
(conductivité thermique, teneur en eau à saturation, albédo, coefficients d'échange, etc).

Evolution des variables d'état

- Certaines variables évoluent uniquement avec des **paramétrisations empiriques** :

- Densité

Paramétrisations de la densité de la neige tombante f (température de l'air, vitesse du vent)



Tassement : loi visco-plastique

$$\frac{dD}{D} = \frac{-\sigma}{\eta} dt$$

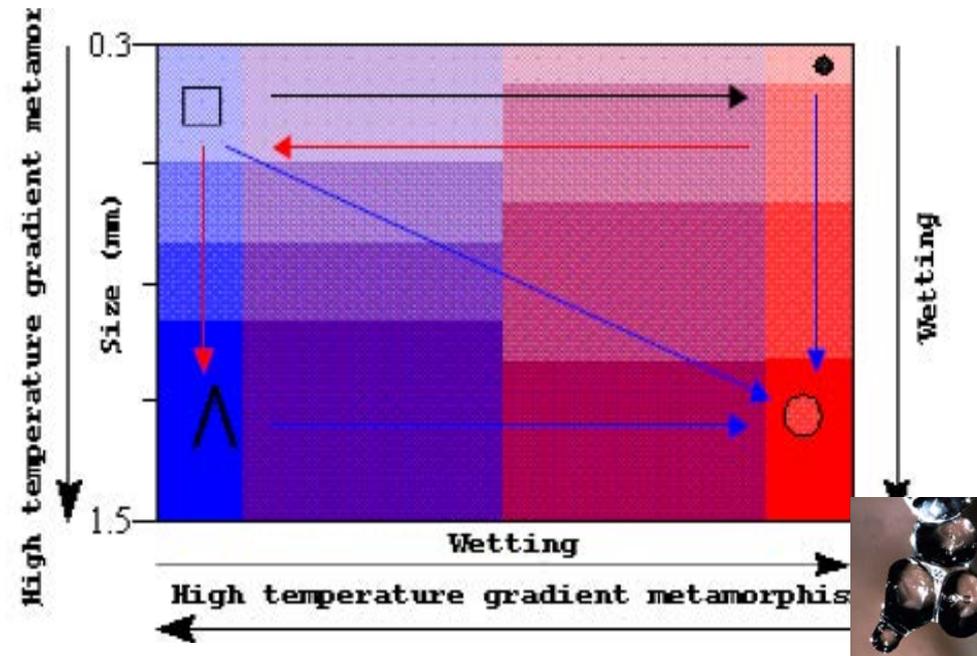
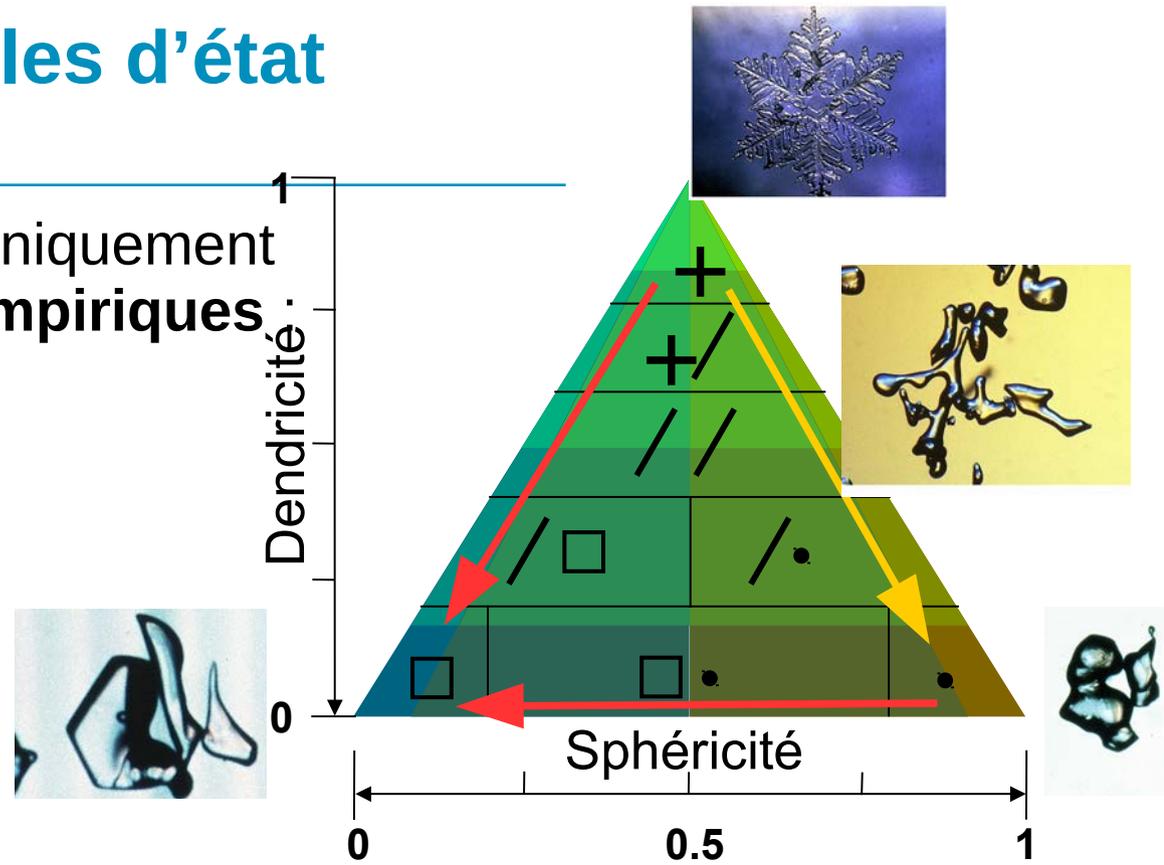
Viscosité = f (densité, température, eau liquide, microstructure)

Evolution des variables d'état

- Certaines variables évoluent uniquement avec des **paramétrisations empiriques**

— Microstructure

- ➔ Fort gradient
- ➔ Faible gradient
- ➔ Fonte / Regel



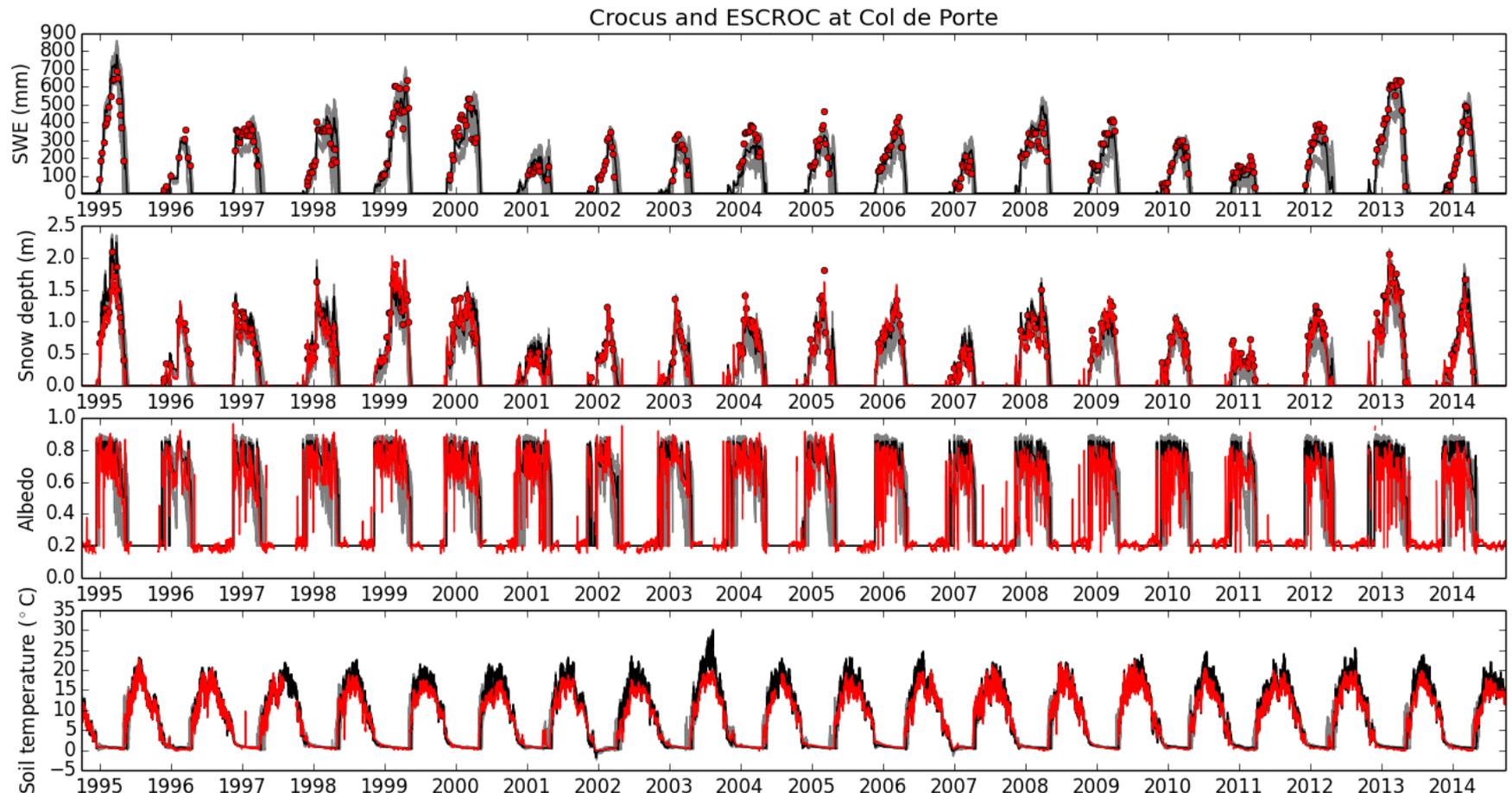
Variables diagnostiques

- Diagnostics intégrés :
Hauteur de neige, Equivalent en eau, Densité totale
- Diagnostics de surface : albédo, température de surface, flux d'énergie
- Diagnostic par couche : relations empiriques entre les variables de microstructure et le type de grains ou certaines propriétés mécaniques (résistance à l'enfoncement, au cisaillement, etc)
- Diagnostics d'épaisseur ou masse en surface respectant des critères sur l'âge, la présence d'eau liquide, le regel, la résistance, etc.

ex : épaisseur de neige < 24h (observation classique)

Confrontation aux observations

- Diagnostics intégrés et diagnostics de surface :
 - Facilement comparable aux observations
 - Disponibilité sur des sites variés, des périodes longues et à bonne résolution temporelle



Exemple : évaluations sur le jeu de données ESM-SnowMIP (Krinner et al 2018, Ménard et al 2019)

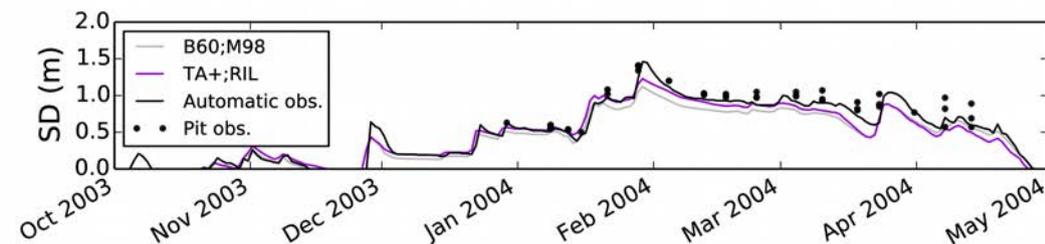
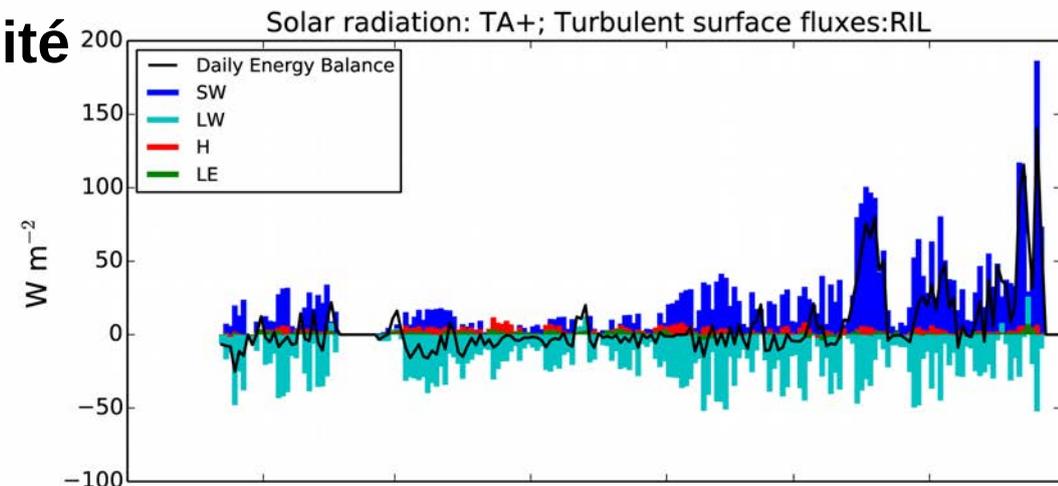
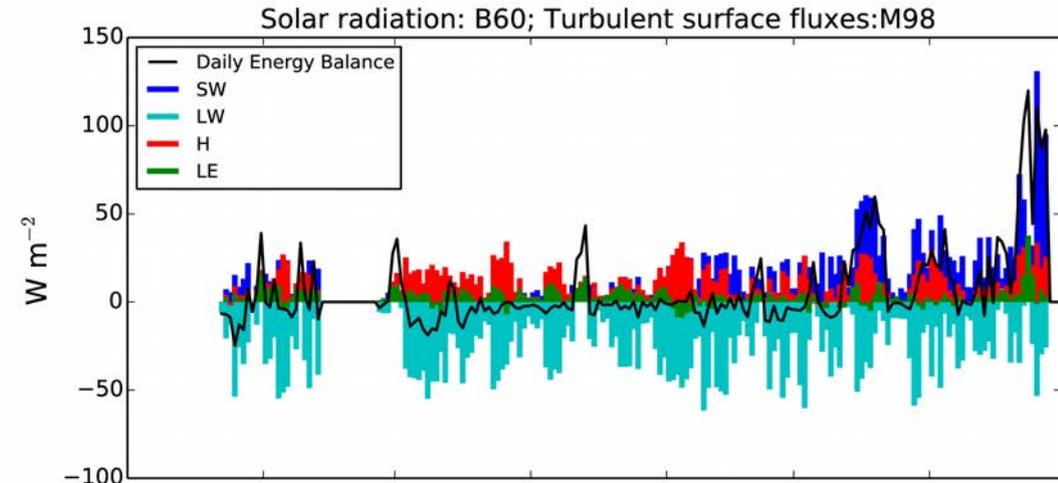
Confrontation aux observations

- Diagnostics intégrés et diagnostics de surface :

- Peu informatifs pour des applications stabilité / avalanches

- Fortement soumis à l'équifinalité entre les paramétrisations empiriques des différents processus

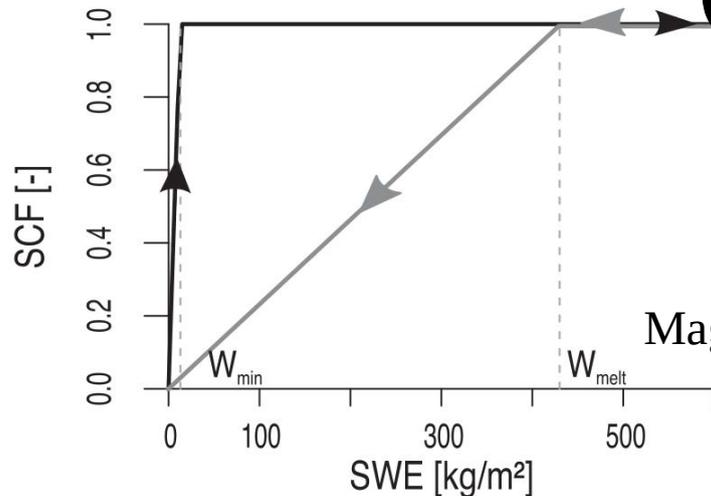
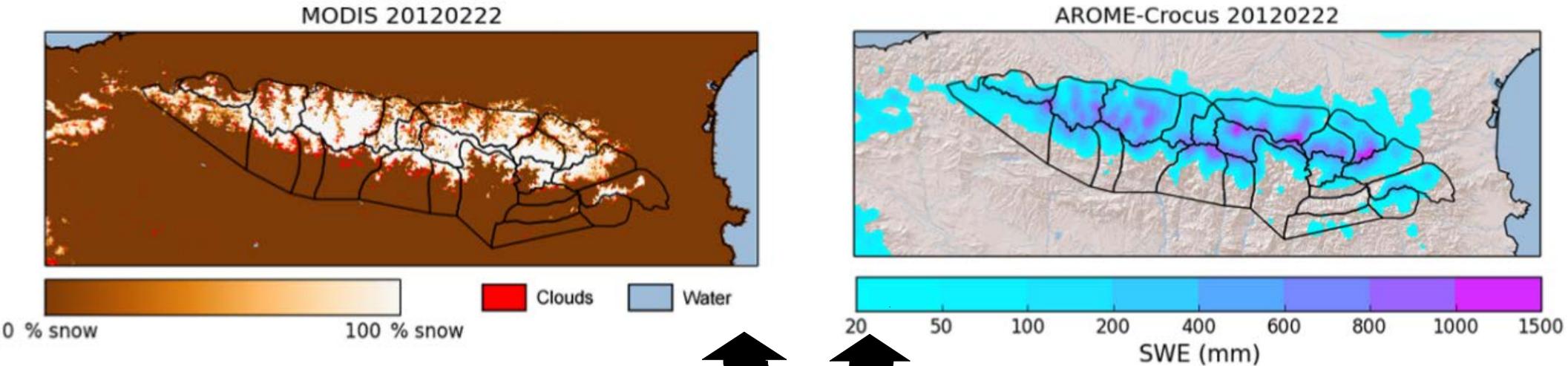
- Flux turbulents largement sous-évalués



Confrontation aux observations

- Diagnostics intégrés et diagnostics de surface : **échelle ponctuelle**
 - Pour des **observations spatialisées**, besoin de fonctions de transfert (**opérateurs d'observation**)

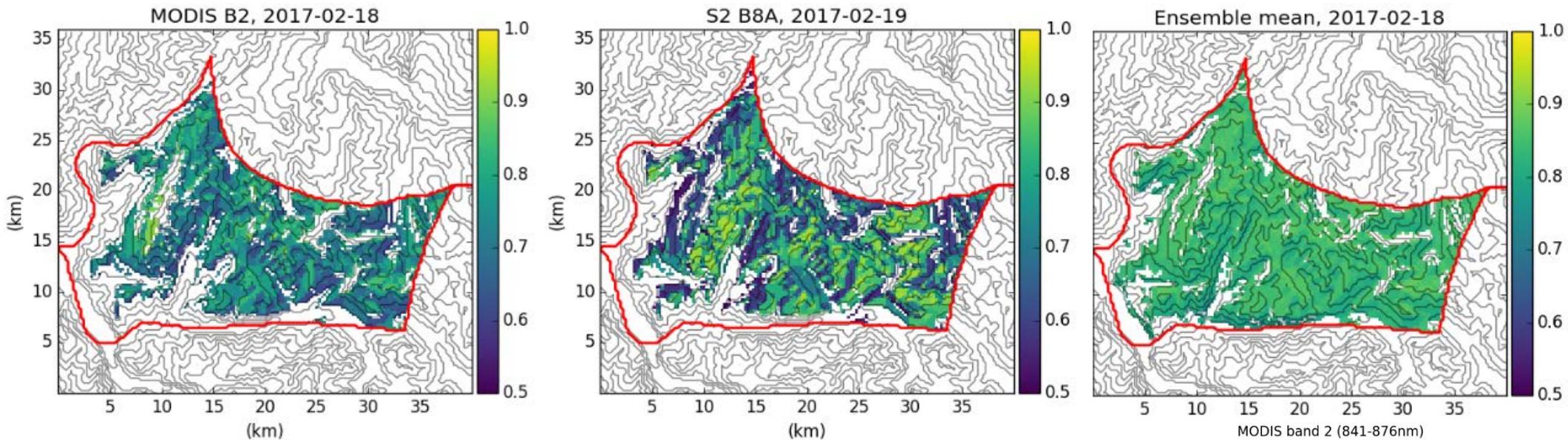
Quéno et al 2016



Magand et al, 2014

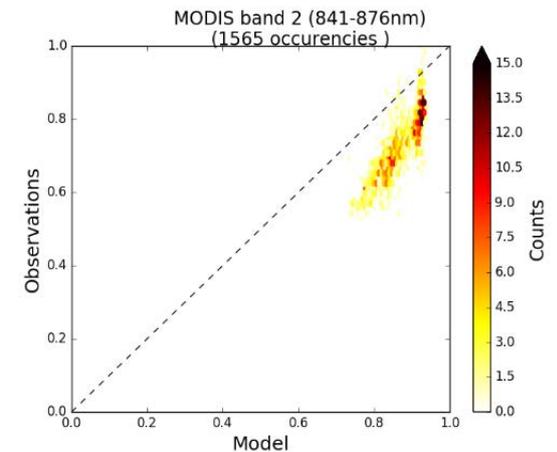
Confrontation aux observations

- Diagnostics intégrés et diagnostics de surface
 - Pour les **réflectances satellites**, opérateur d'observation facilité par l'utilisation de variables d'état physiques :
SSA + impuretés --> transfert radiatif TARTES



Exemple : comparaison de réflectances proche infra-rouge (~ 860 nm) par classes topographiques, Grandes Rousses

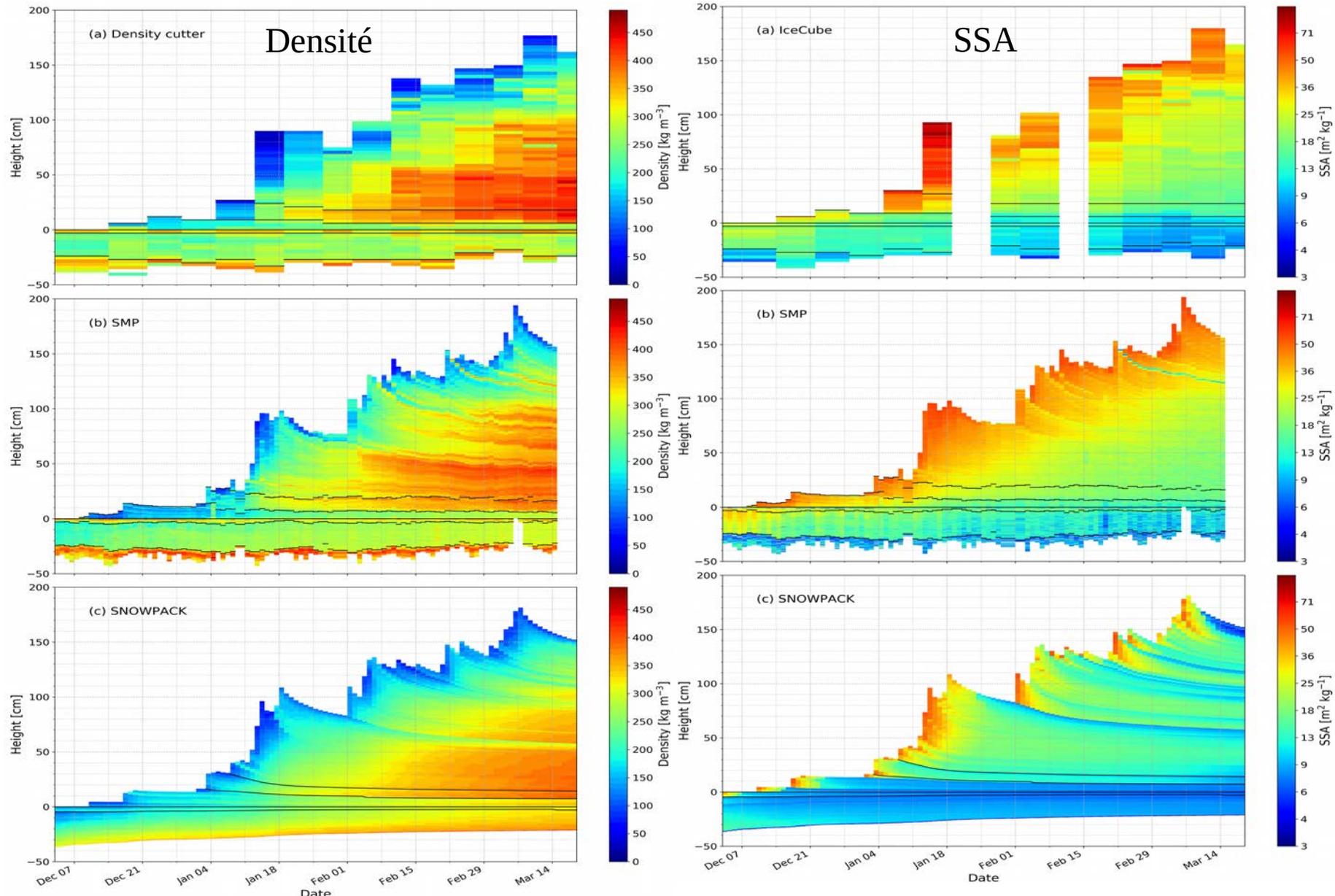
Cluzet et al, soumis



Confrontation aux observations

■ Variables d'état

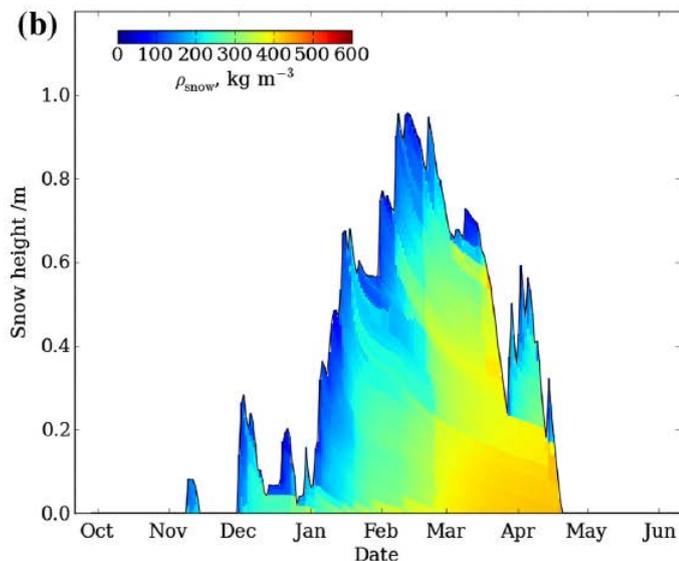
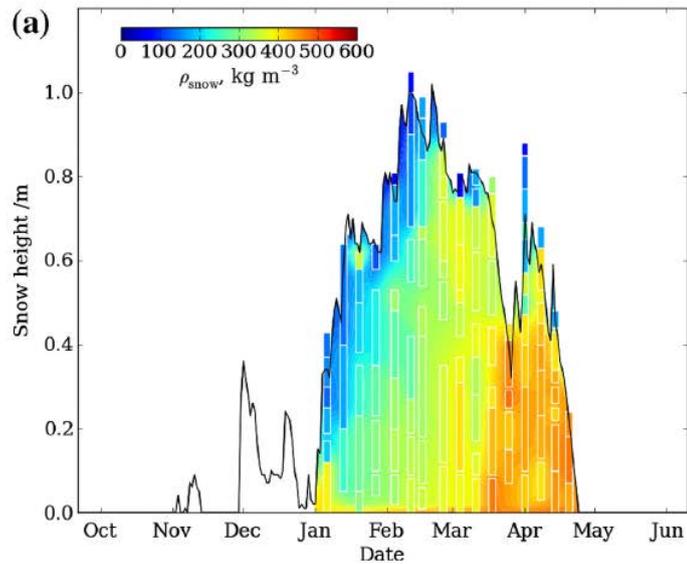
RHOSSA dataset vs SNOWPACK model (Weissfluhjoch, Calonne et al, in prep.)



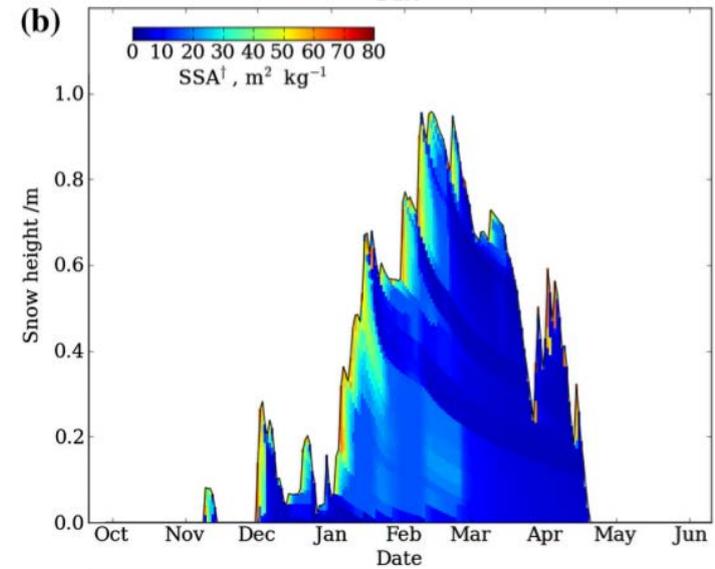
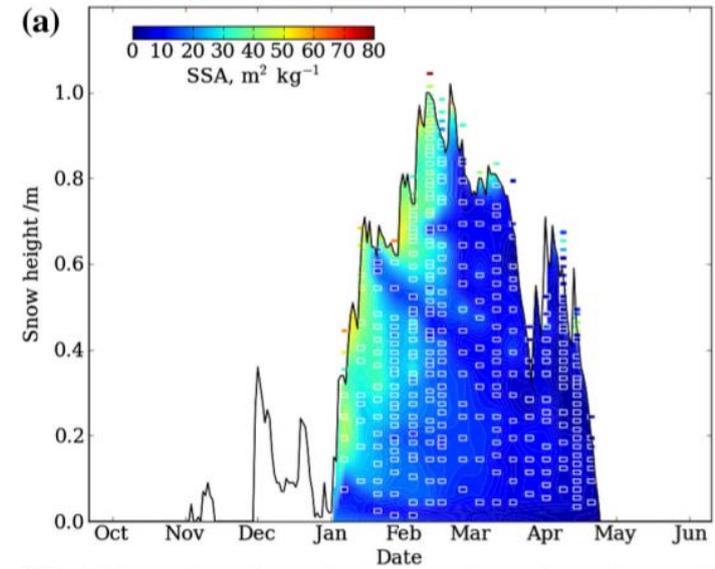
Confrontation aux observations

- Variables d'état
Profils du Col de Porte vs modèle Crocus (Morin et al 2013)

Densité



SSA

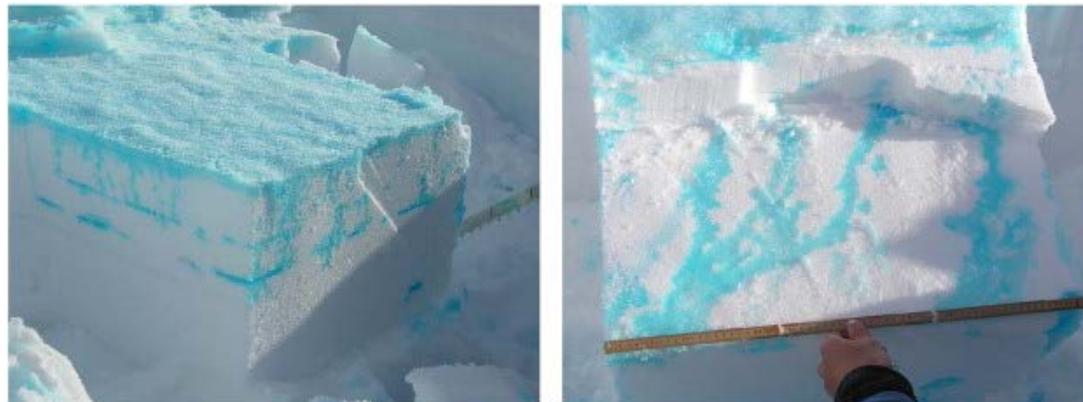


Confrontation aux observations

- Variables d'état : difficultés
 - Difficulté liée au **manque d'observations** (représentativité spatiale et temporelle des évaluations du modèle, résolution verticale)

 - Difficulté liée à la **non observabilité** de certaines variables :
 - ▶ Sphéricité

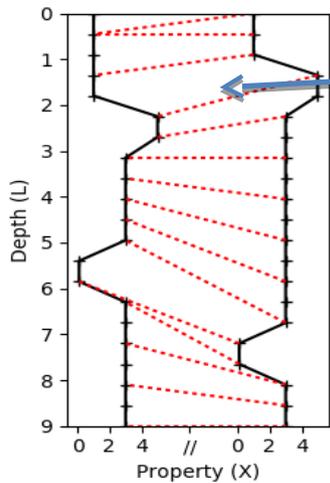
 - Difficulté liée à la **variabilité horizontale**
 - ▶ Contenu en eau liquide



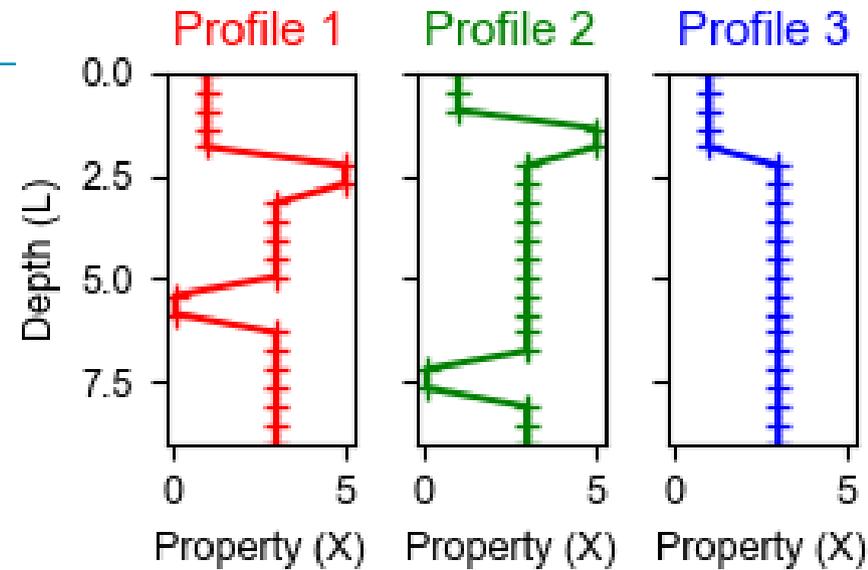
Techel et al., 2011

Confrontation aux observations

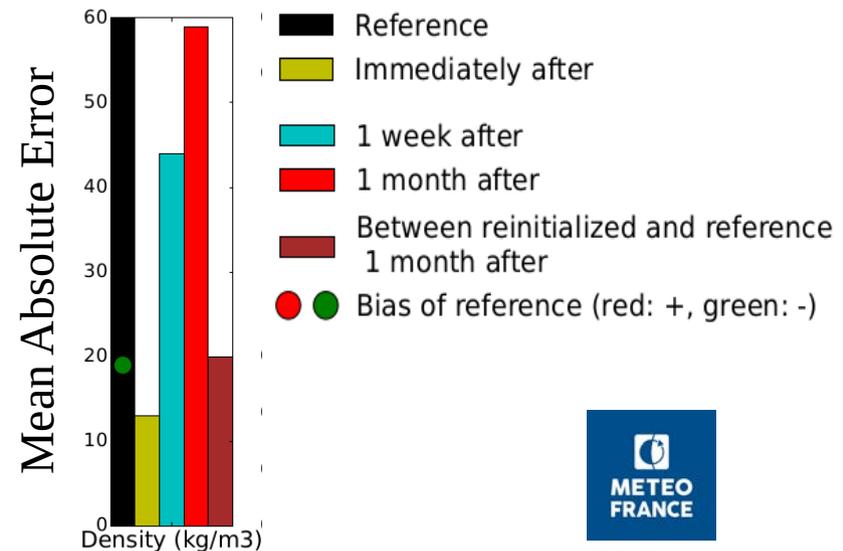
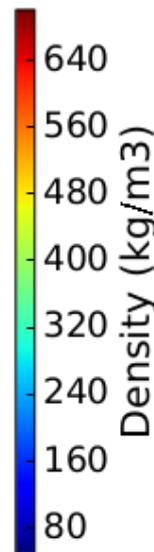
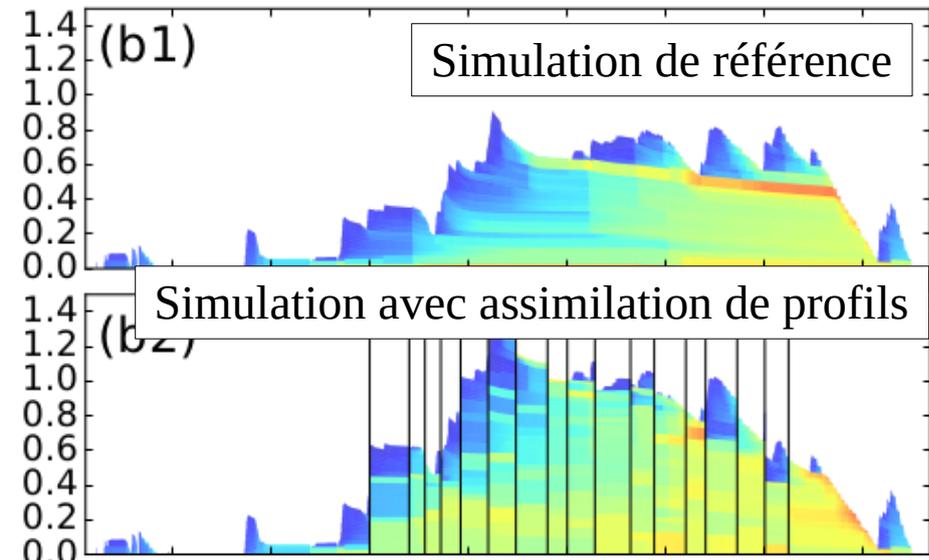
- Variables d'état : difficultés
 - Difficulté méthodologique liée au **décalage vertical des couches de neige**



Un algorithme de **mapping** permet de calculer des métriques plus représentatives de la performance du modèle (biais, MAE, etc)



Hagenmuller et al, 2018



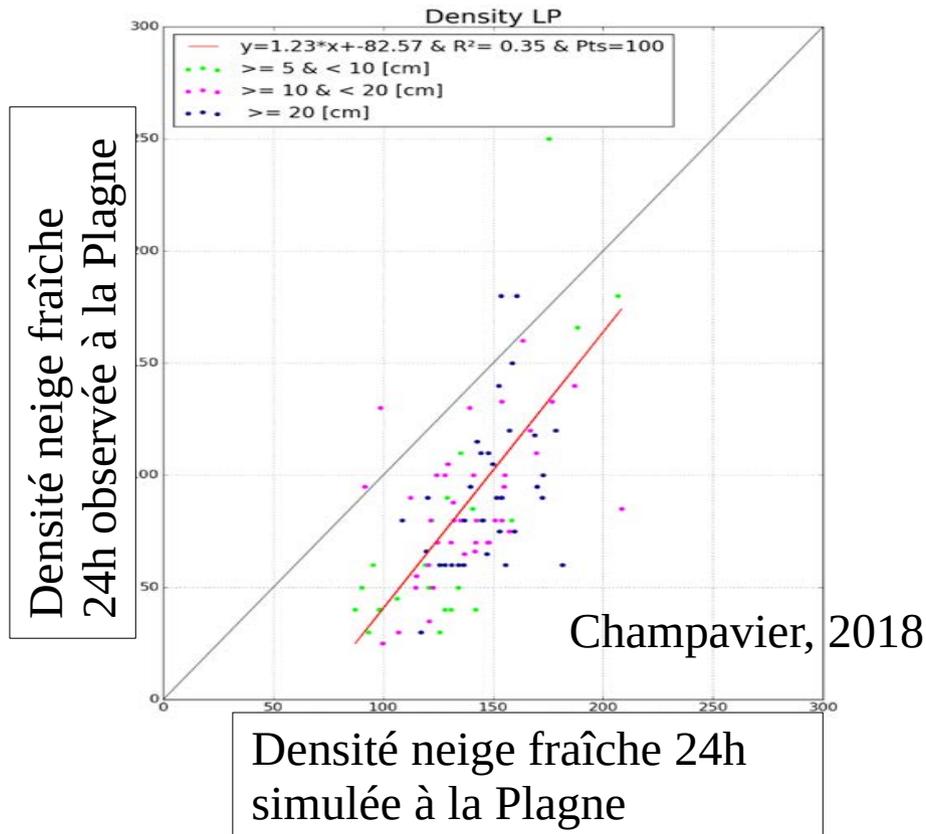
Viallon et al, in prep

Confrontation aux observations

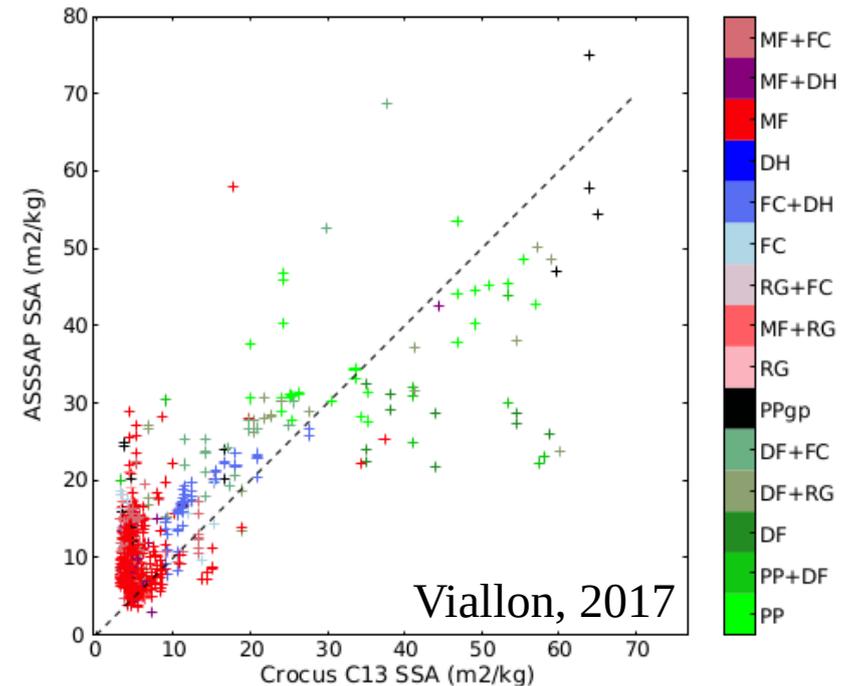
- Variables d'état : difficultés

- **Compensations d'erreur** → pas possible de corriger une paramétrisation indépendamment des autres

Biais densité de la neige récente
Pas de biais sur la hauteur de neige



Biais SSA de la neige humide au CDP
Pas de biais d'albédo



- Compensation avec les param. d'albédo
- Contradictoire autre année / autre instrument
- Cause : métamorphisme ?
percolation ?
bilan de surface ?

Conclusions

- L'**observabilité** des variables d'état est nécessaire :
 - Pour caractériser le réalisme des processus représentés dans les modèles
 - Pour offrir des opportunités d'assimilation de données
 - Pour améliorer les lois d'évolution ou enrichir leur caractère physique
- Elle ne suffit pas à résoudre tous les **challenges méthodologiques** d'évaluation des modèles (représentativité spatiale, erreurs des forçages, décalage vertical)
- Modifier les variables d'état nécessite de définir de **nouvelles lois d'évolution**.
 - Paramétrisations empiriques soumises à de fortes équifinalités
 - Lois physiques jamais exemptes de paramétrisations empiriques