

Modélisation du bilan de masse en surface de la calotte glaciaire antarctique

Luc Gentil
sous la direction d'Hubert Gallée

Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007



L'Antarctique et le niveau moyen des mers

Un grand réservoir

- 70 % des réserves d'eau douce de la planète
- Volume des glaces posées : $24,7 \cdot 10^6 \text{ km}^3$
- Équivalent hausse du niveau moyen des mers : 56,6 m

Évolution actuelle

Contribution actuelle de l'Antarctique au niveau des mers : $0,21 \pm 0,35 \text{ mm.an}^{-1}$
(moyenne sur 1993–2003).

Source : GIEC, *Climate Change 2007 (AR4)*.

Projections pour le XXI^e siècle

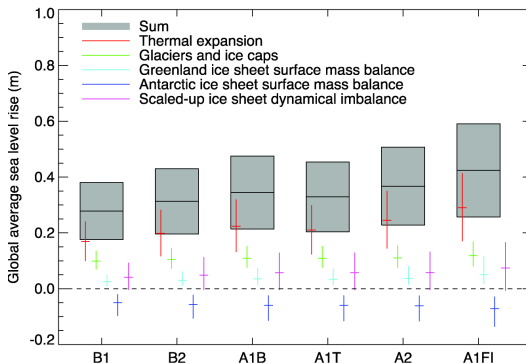


FIG.: Projections et incertitudes de l'augmentation du niveau moyen des mers et de ses composantes entre 1980–1999 et 2090–2099. Source : GIEC, 2007.

Projections pour le XXI^e siècle

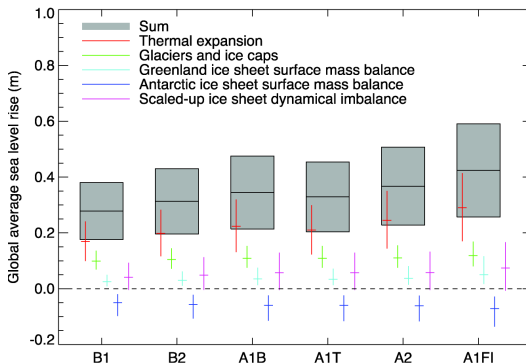


FIG.: Projections et incertitudes de l'augmentation du niveau moyen des mers et de ses composantes entre 1980–1999 et 2090–2099. Source : GIEC, 2007.

Bilan de masse en surface antarctique : principal facteur de limitation de la hausse du niveau des mers pour le XXI^e siècle (–0,14 à –0,02 m).

Définition du bilan de masse en surface

Bilan de masse en surface :

$$BMS(x, y, 0 \rightarrow t) = \int_0^t \{P_s + P_l + (D - E) - Su - R\} d\tau$$

- P_s Précipitation solide
- P_l Précipitation liquide
- D Dépôt de neige par le vent
- E Érosion de neige par le vent
- Su Sublimation à la surface
- R Ruissellement

Définition du bilan de masse en surface

Bilan de masse en surface :

$$BMS(x, y, 0 \rightarrow t) = \int_0^t \{P_s + P_l + (D - E) - Su - R\} d\tau$$

- P_s Précipitation solide
- P_l Précipitation liquide
- D Dépôt de neige par le vent
- E Érosion de neige par le vent
- Su Sublimation à la surface
- R Ruissellement

Accumulation :

$$Accu(x, y, 0 \rightarrow t) = \int_0^t \{P_s + (D - E)\} d\tau$$

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - **La modélisation**
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Motivations pour la modélisation

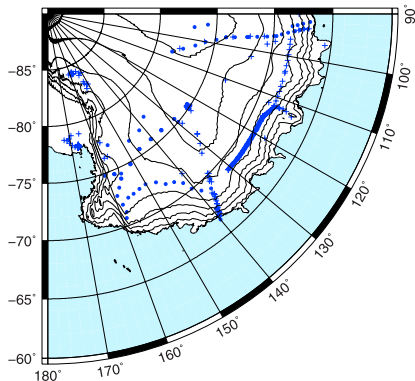


FIG.: Observations *in situ* du BMS en Antarctique de l'Est (Magand *et al.*, 2007).

Objectifs

- Complément du réseau d'observations (climat extrême et territoire immense)
- Étude de processus (transport de neige par le vent)
- Prévision

Motivations pour la modélisation

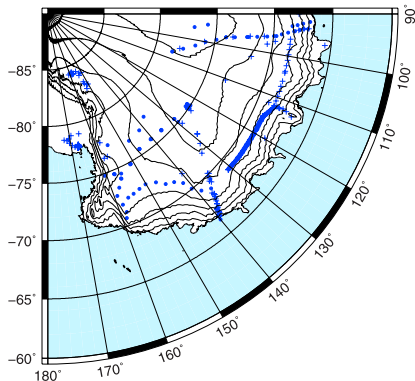


FIG.: Observations *in situ* du BMS en Antarctique de l'Est (Magand *et al.*, 2007).

Objectifs

- Complément du réseau d'observations (climat extrême et territoire immense)
- Étude de processus (transport de neige par le vent)
- Prévision

Avant de réaliser des prévisions, nécessité de « valider » le modèle sur une période du climat passé à l'aide d'observations !

Quel(s) modèle(s) ?

Rapidité de calcul vs Réalisme

Modèle	Résolution	Taille domaine	Physique
MCGA	*	***	**
MCGaz	**	***	**
MCR	**	**	***(MAR)
DSG	***	illimitée	*

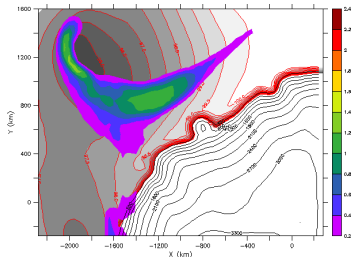


FIG.: Couleurs : P_s (mmEQ.h^{-1}). Grisé : pression au sol (kPa).

Mécanismes de la précipitation en Antarctique

- Côtes** Passage de fronts
- Pentes** Soulèvement de masses d'air venues de la mer
- Plateau** Précipitation par temps clair

Quel(s) modèle(s) ?

Rapidité de calcul vs Réalisme

Modèle	Résolution	Taille domaine	Physique
MCGA	*	***	**
MCGaz	**	***	**
MCR	**	**	***(MAR)
DSG	***	illimitée	*

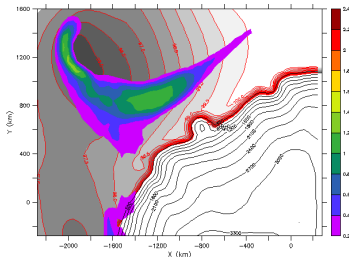


FIG.: Couleurs : P_s (mmEQ.h^{-1}). Grisé : pression au sol (kPa).

Mécanismes de la précipitation en Antarctique

- Côtes** Passage de fronts
- Pentes** Soulèvement de masses d'air venues de la mer ← **Résolution**
- Plateau** Précipitation par temps clair

Quel(s) modèle(s) ?

Rapidité de calcul vs Réalisme

Modèle	Résolution	Taille domaine	Physique
MCGA	*	***	**
MCGaz	**	***	**
MCR	**	**	***(MAR)
DSG	***	illimitée	*

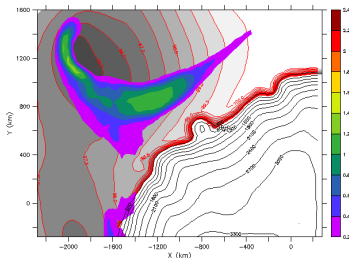


FIG.: Couleurs : P_s (mmEQ.h⁻¹). Grisé : pression au sol (kPa).

Mécanismes de la précipitation en Antarctique

- Côtes** Passage de fronts
- Pentes** Soulèvement de masses d'air venues de la mer ← **Résolution**
- Plateau** Précipitation par temps clair

Quel(s) modèle(s) ?

Rapidité de calcul vs Réalisme

Modèle	Résolution	Taille domaine	Physique
MCGA	*	***	**
MCGaz	**	***	**
MCR	**	**	***(MAR)
DSG	***	illimitée	*

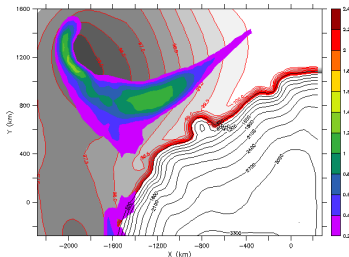


FIG.: Couleurs : P_s (mmEQ.h^{-1}). Grisé : pression au sol (kPa).

Mécanismes de la précipitation en Antarctique

- Côtes** Passage de fronts
- Pentes** Soulèvement de masses d'air venues de la mer ← Résolution
- Plateau** Précipitation par temps clair

Solution développée : l'imbrication
ERA-40 → MAR → DSG.

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - **Le modèle atmosphérique régional (MAR)**
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Présentation du MAR

Classe Modèles climatiques régionaux

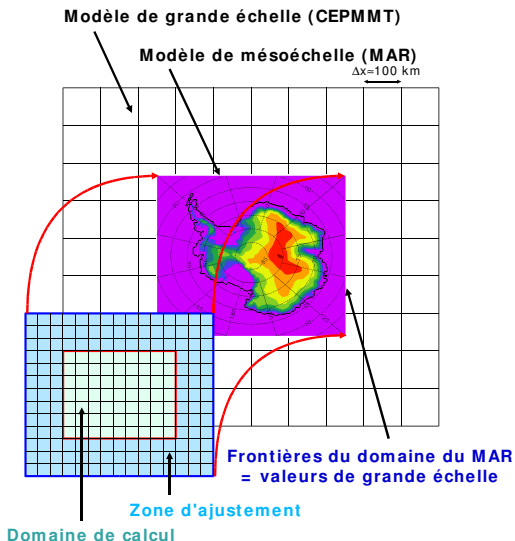
Spécificité Développé pour les régions polaires :

- Modèle de neige interactif
- Transport de neige par le vent (couplage)

Contributions UCL-ASTR et LGGE

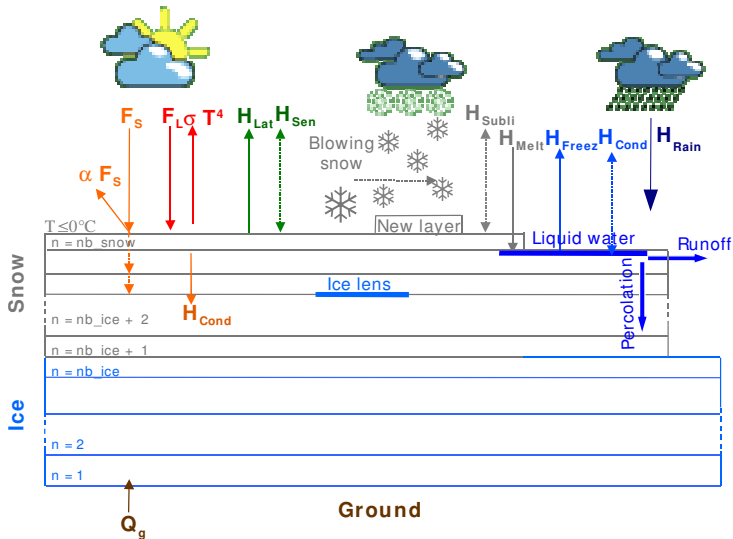
Visée Météorologie et climatologie

Imbrication du MAR dans un modèle hôte



- Conditions aux limites :
 - latérales,
 - inférieures,
 - supérieures;
- Conditions initiales.

Le modèle de neige et glace du MAR



Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - **Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)**
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Présentation du DSG

Désagrégation Spatialisation « intelligente », descente d'échelle.

Caractéristiques du DSG

- désagrégation spatiale
- calcul diagnostique
- approche physique

Historique

- 1 Sinclair (1994) : Nouvelle-Zélande (cyclone tropical)
- 2 Funk (1999) : NW des États-Unis
- 3 Brasseur (2003) : Alpes
- 4 Fettweiss (2006) : Groenland
- 5 Gentil (2007) : Antarctique

Description du DSG

Entrées

- Variables de grande échelle :

$z_s(x, y)$ Altitude de la surface
 $Pr(x, y, t)$ Précipitation (solide + liquide)
 $p(x, y, z, t)$ Pression
 $T(x, y, z, t)$ Température
 $q(x, y, z, t)$ Humidité spécifique
 $r_w(x, y, z, t)$ Rapport de mélange pour l'eau
 $V(x, y, z, t)$ Vent (3D)

- Topographie à fine échelle

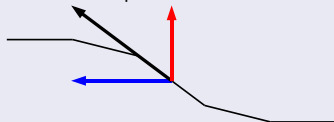
Sorties

- Précipitation désagrégée à fine échelle

Processus pris en compte dans le DSG

Dynamique

- Vitesse horizontale inchangée ;
- Vitesse verticale modifiée par la topographie de fine échelle :
 - Condition cinématique en surface :



$$W_s = V_s \cdot \nabla Z_s$$

- Théorie des ondes de gravité orographiques.

Processus pris en compte dans le DSG

Physique

- Détente adiabatique de l'air soulevé ;
- Condensation lorsque la saturation est atteinte ;
- Conversion en hydrométéores contrôlée par l'humidité relative des basses couches ;
- Délai pour la formation des hydrométéores ;
- Déplacement des hydrométéores :
 - Vitesse de chute fonction de la phase,
 - Advection par les vents horizontaux au niveau de formation.

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - **Présentation des expériences**
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Les différentes expériences avec le MAR

	<i>Résolution</i>	<i>Transport de neige</i>	<i>Période</i>
(1)	40 km	Activé	1998–2001
(2)	40 km	Désactivé	1998–2001
(3)	80 km	Désactivé	1998–2001

(1) et (2) : sensibilité au transport de neige par le vent

(2) et (3) : sensibilité à la résolution spatiale

Les différentes expériences avec le MAR

	<i>Résolution</i>	<i>Transport de neige</i>	<i>Période</i>
(1)	40 km	Activé	1998–2001
(2)	40 km	Désactivé	1998–2001
(3)	80 km	Désactivé	1998–2001

(1) et (2) : sensibilité au transport de neige par le vent

(2) et (3) : sensibilité à la résolution spatiale

Les différentes expériences avec le MAR

	<i>Résolution</i>	<i>Transport de neige</i>	<i>Période</i>
(1)	40 km	Activé	1998–2001
(2)	40 km	Désactivé	1998–2001
(3)	80 km	Désactivé	1998–2001

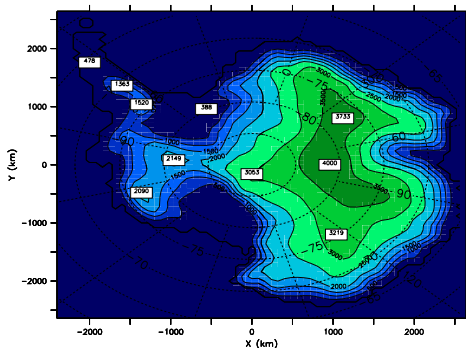
(1) et (2) : sensibilité au transport de neige par le vent

(2) et (3) : sensibilité à la résolution spatiale

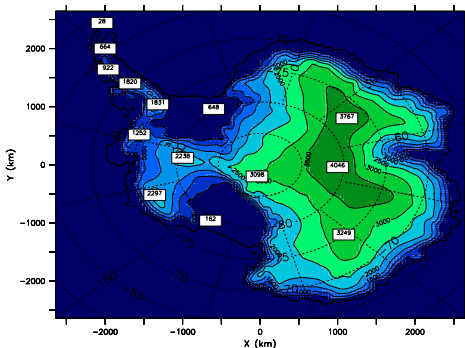
Plan de l'exposé

- 1 Présentation des modèles
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - **Sensibilité du BMS**
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Influence de la résolution spatiale sur la topographie



(a) z_s @ 80 km



(b) z_s @ 40 km

FIG.: Topographie $z_s(x, y)$, en m.

- Davantage d'extrema à résolution fine ;
- Pentes côtières plus raides : forçage orographique renforcé ;
- Creusement des vallées, élévation des crêtes : affirmation des reliefs E – W.

Influence de la résolution spatiale sur l'accumulation

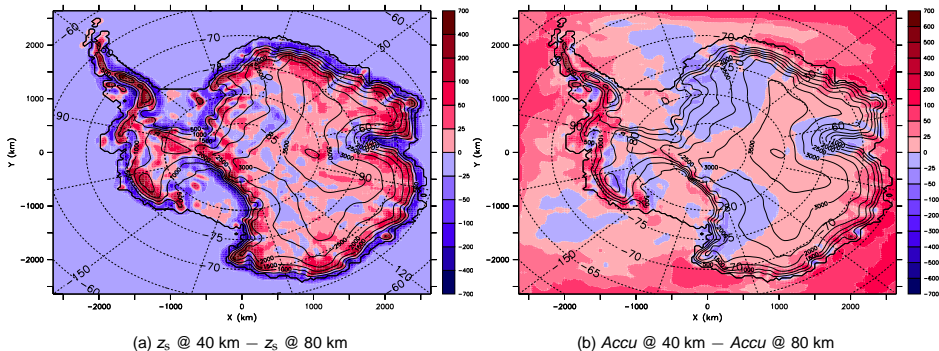


FIG.: Différences orographiques en m (a) et différentiel d'accumulation en mmEQ.an⁻¹ (b). Transport de neige inactif, 1998–2001.

- Accentuation de la distribution zonale de la précipitation entre les versants E et W
- Augmentation de la précipitation en mer

Influence de la résolution spatiale sur l'accumulation

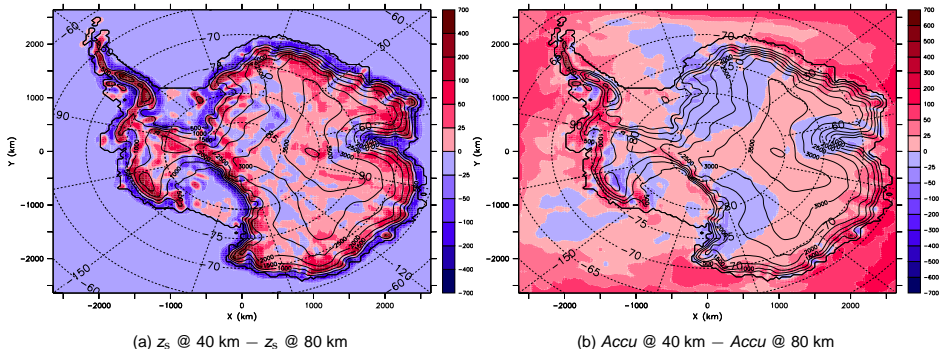


Fig.: Différences orographiques en m (a) et différentiel d'accumulation en mmEQ.an^{-1} (b). Transport de neige inactif, 1998–2001.

- Accentuation de la distribution zonale de la précipitation entre les versants E et W = meilleure représentation de l'orographie
- Augmentation de la précipitation en mer = meilleure résolution des fronts

Sensibilité du BMS au transport de neige par le vent

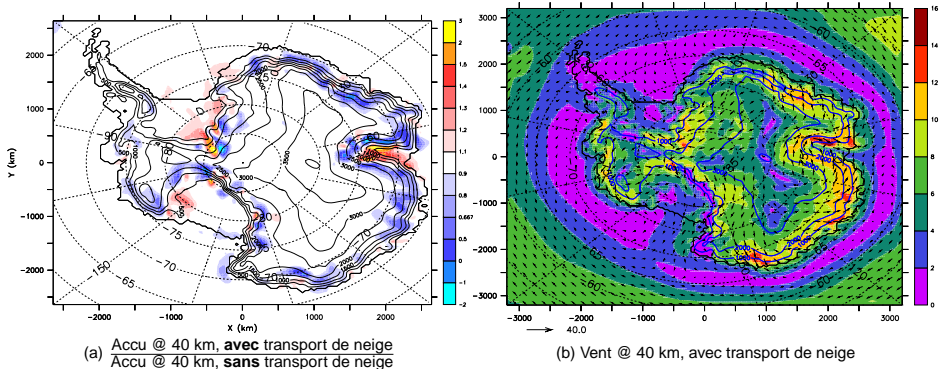


FIG.: Années 1998–2001.

- Perte nette de 5,7 % pour le continent
- Redistribution de la précipitation à l'échelle régionale

Sensibilité du BMS au transport de neige par le vent

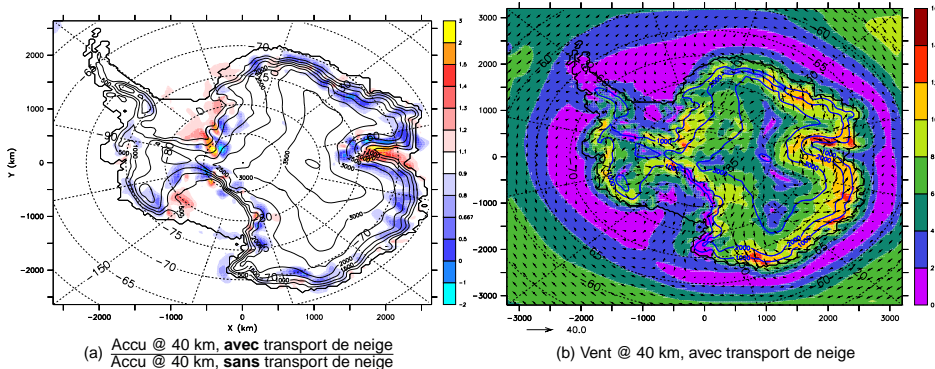
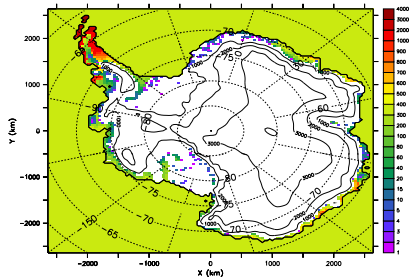


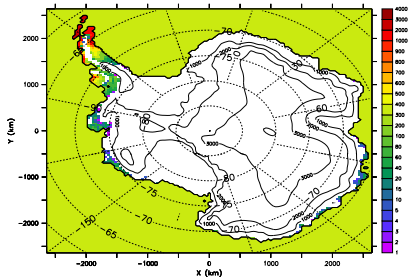
FIG.: Années 1998–2001.

- Perte nette de 5,7 % pour le continent
= sublimation des grains en suspension + évacuation au-delà des côtes
- Redistribution de la précipitation à l'échelle régionale
= accélérations / décélérations

Sensibilité du ruissellement à la paramétrisation de l'albédo



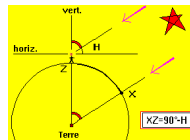
(a) Avec albédo témoin (1998–2001)



(b) Avec albédo modifié (1980–1982)

FIG.: Ruissellement en mmEQ.an^{-1} (MAR, 40 km de résolution, avec chasse-neige).

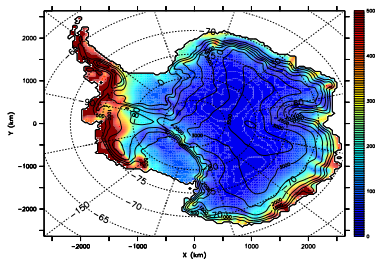
Bien tenir compte de la distance zénithale du Soleil dans le calcul de l'albédo !



Plan de l'exposé

- 1 Présentation des modèles
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - **Comparaison avec les compilations**
- 3 Évaluation du désagrégateur
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Comparaison MAR – Arthern *et al.* (2006)



(a) MAR

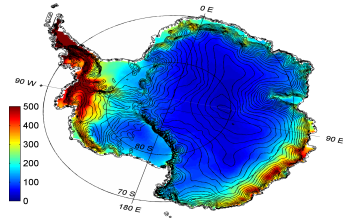
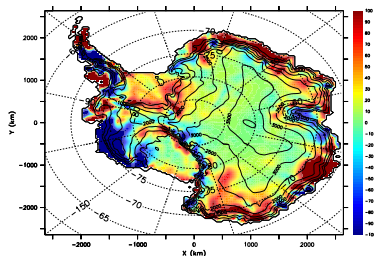
(b) Arthern *et al.* (2006)

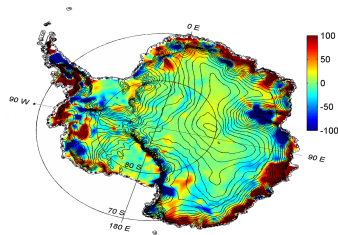
FIG.: Bilan de masse en surface (mmEQ.an^{-1}) : comparaison MAR (40 km, avec transport de neige, 1998–2001, ruissellement exclu) – Arthern. Les valeurs sont tronquées comme dans la publication.

Bon accord général : gradient S–N, variabilité E/W (orientations), **fortes accumulations en terre Marie-Byrd et péninsule**, faibles accumulations sur le plateau et sur les plates-formes glaciaires de Ross et de Filchner-Ronne.

Comparaison MAR – Arthern *et al.* (2006) – Vaughan *et al.* (1999)



(a) Vaughan – MAR



(b) Vaughan – Arthern

FIG.: Bilan de masse en surface (mmEQ) : comparaison MAR (40 km, avec transport de neige, 1998 – 2001, ruissellement exclu) – Arthern à travers leurs différences respectives avec Vaughan *et al.* (1999).

Biais communs vis-à-vis de Vaughan *et al.* (1999) : glacier Lambert, Davis, cap Adare, flanc W de la côte de Knox, flanc E de Dôme C, plates-formes de Wilkins et de Larsen B.

Plan de l'exposé

- 1 Présentation des modèles
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 Simulations MAR
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 Évaluation du désagrégateur
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Plan de l'exposé

- 1 **Présentation des modèles**
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 **Simulations MAR**
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 **Évaluation du désagrégateur**
 - **Méthodologie**
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Construction d'un bilan de masse en surface désagrégé

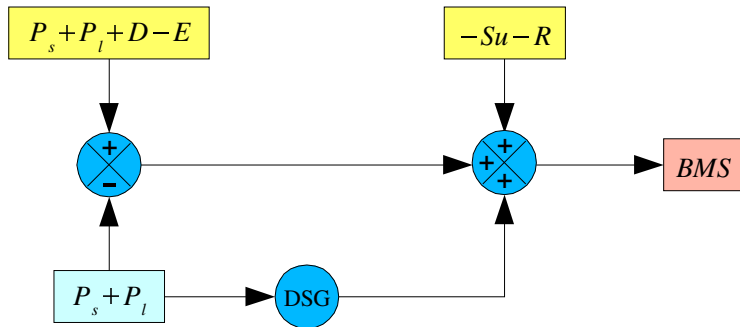


Fig.: En jaune (resp. bleu ciel), les sorties MAR avec (resp. sans) transport de neige par le vent. BMS, P_s , P_l , D , E , Su et R : Bilan de Masse en Surface, Précipitations Solide et Liquide, Dépôt et Érosion de neige par le vent, Sublimation de neige à la surface de la calotte et Ruissellement.

Plan de l'exposé

- 1 Présentation des modèles
 - La modélisation
 - Le modèle atmosphérique régional (MAR)
 - Le modèle de désagrégation des précipitations (DSG)
- 2 Simulations MAR
 - Présentation des expériences
 - Sensibilité du BMS
 - Comparaison avec les compilations
- 3 Évaluation du désagrégateur
 - Méthodologie
 - Évaluation sur la région du Law Dome

Carte de la région du Law Dome

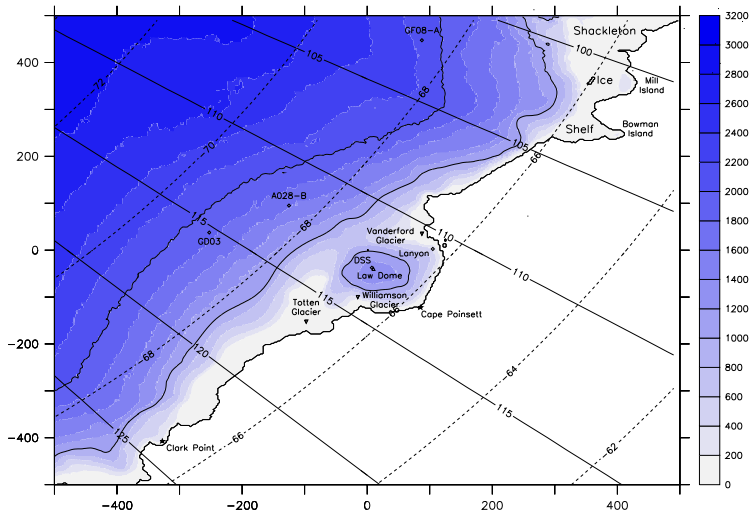


FIG.: Altitude de la surface (m).



Sensibilité du désagrégateur à sa résolution spatiale

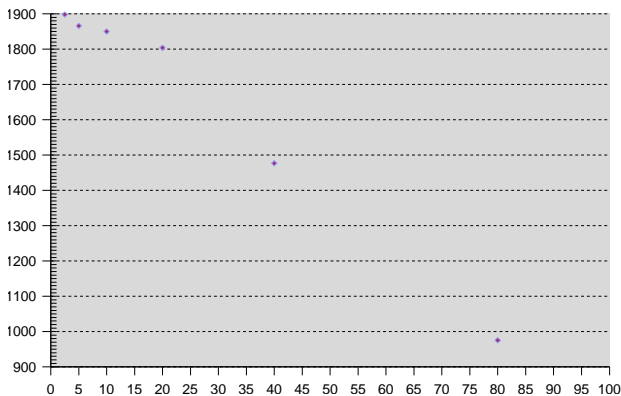


FIG.: Maximum global de précipitation (en mmEQ.an^{-1}) pour l'année 1999 en fonction de la résolution spatiale choisie (en km).

Sensibilité du désagrégateur à sa résolution spatiale

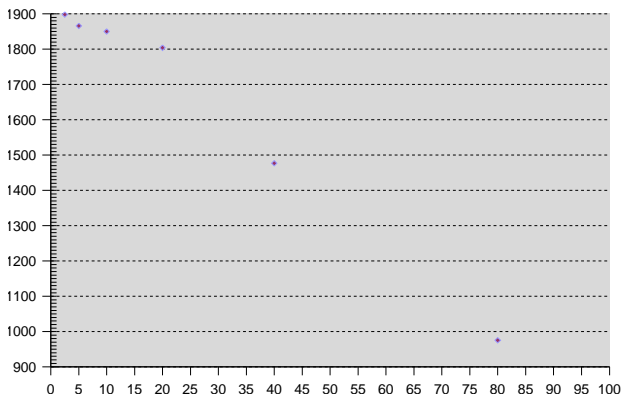


FIG.: Maximum global de précipitation (en mmEQ.an^{-1}) pour l'année 1999 en fonction de la résolution spatiale choisie (en km).

Convergence : stabilité vis-à-vis de la résolution.

Comparaison aux AWS dans la région du Law Dome

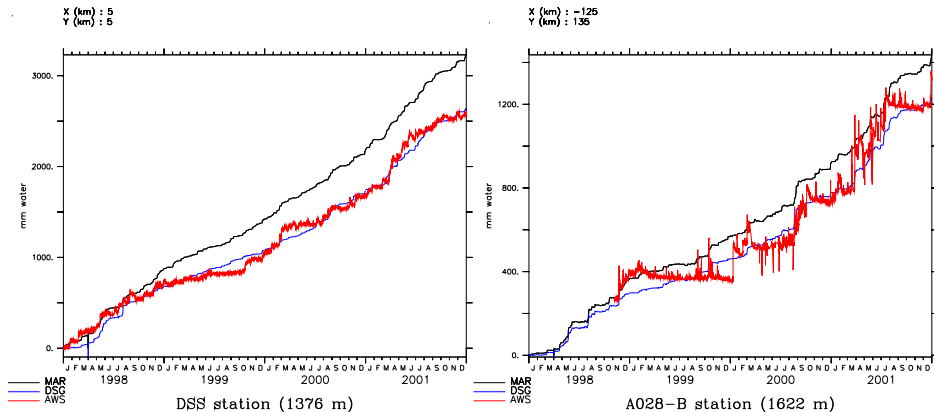


FIG.: Bilan de masse en surface (mmEQ) : comparaison MAR 40 km, MAR 40 km → DSG 5 km et AWS.

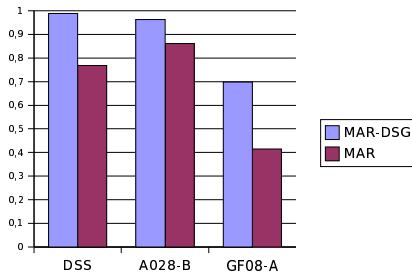
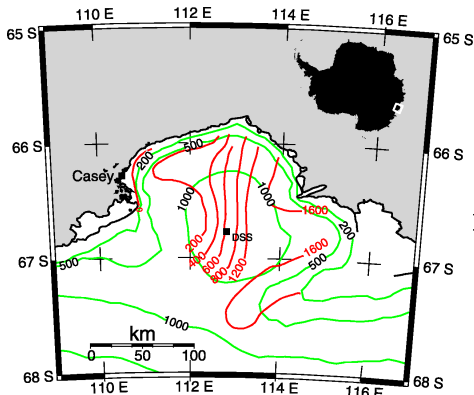


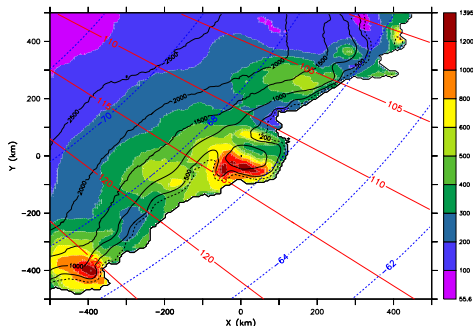
FIG.: Bilan de masse en surface : **efficacités statistiques** avec les données AWS.

Par rapport à MAR seul, MAR → DSG améliore les efficacités pour chacun des 3 sites.

Existence d'un gradient d'accumulation au Law Dome



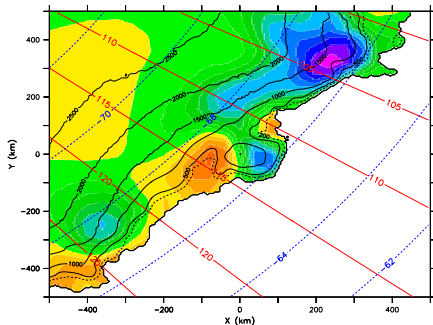
(a) Observations (van Ommen *et al.*, 2006)



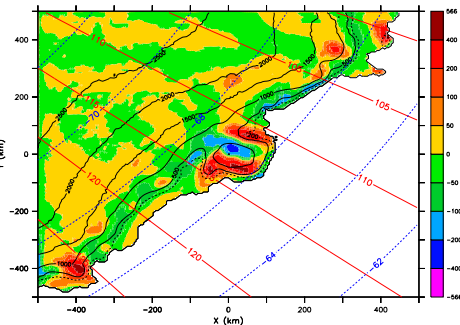
(b) MAR @ 40 km → DSG @ 5 km

FIG.: Carte climatologique du bilan de masse en surface sur le Law Dome : (a) observations ; (b) simulation 1998–2001 (mmEQ.an^{-1}). DSS : *Law Dome Summit South*.

Origine du gradient d'accumulation du Law Dome



(a) Effet du transport de neige sur l'accumulation



(b) Effet de la désagrégation sur les précipitations

FIG.: (b) : Les précipitations issues de la simulation sans transport de neige ont été soustraites au résultat de leur désagrégation. Unité : mmEQ.an^{-1} .

Direction et intensité montrent que le gradient est davantage lié à la précipitation qu'au chasse-neige.

Conclusion

MAR

- Évaluation à l'aide de la compilation d'Arthern *et al.*(2006)
- Mise en évidence de la sensibilité du ruissellement à la paramétrisation de l'albédo
- Constatation de la capacité du MAR à former des nuages stratosphériques polaires au cours de la nuit polaire

DSG

- Portage du modèle sur l'Antarctique
- Développement de nouvelles paramétrisations (vitesse verticale)
- Évaluation sur la région du *Law Dome* à l'aide de mesures AWS et de carottages

Perspectives

Développement du modèle de désagrégation

Évaluation du modèle de désagrégation

Applications du modèle de désagrégation

Perspectives

Développement du modèle de désagrégation

- Désagrégation du chasse-neige
- Convergence des flux d'humidité, refroidissement radiatif
- Évaporation des hydrométéores par les couches insaturées
- Implantation d'une méthode « intelligente » pour départager MAR et MAR → DSG, basée sur un critère de pente

Évaluation du modèle de désagrégation

Applications du modèle de désagrégation

Perspectives

Développement du modèle de désagrégation

Évaluation du modèle de désagrégation

- Utilisation des AWS de l'université d'Utrecht
- Utilisation des données Glacioclim
- Utilisation des densités de neige calculées par le MAR

Applications du modèle de désagrégation

Perspectives

Développement du modèle de désagrégation

Évaluation du modèle de désagrégation

Applications du modèle de désagrégation

- Application à d'autres régions accidentées : péninsule Antarctique, Andes, Alpes
- Fournir des données météorologiques spatialisées aux modèles distribués de bilan de masse en surface des glaciers



Merci
de votre
attention !

Contact luc.gential@ensta.org