



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



CADARACHE



Vers une meilleure connaissance des conditions météorologiques locales pour l'étude de la dispersion atmosphérique

Florian Dupuy

Doctorant

Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement – CEA

Cadarache

Laboratoire d'Aérodynamique – Université Toulouse III – Paul Sabatier

Directeurs de Thèse

Pierre Durand, Laboratoire d'Aérodynamique – Université Toulouse III – Paul

Sabatier

Thierry Hedde et Pierre Roubin,

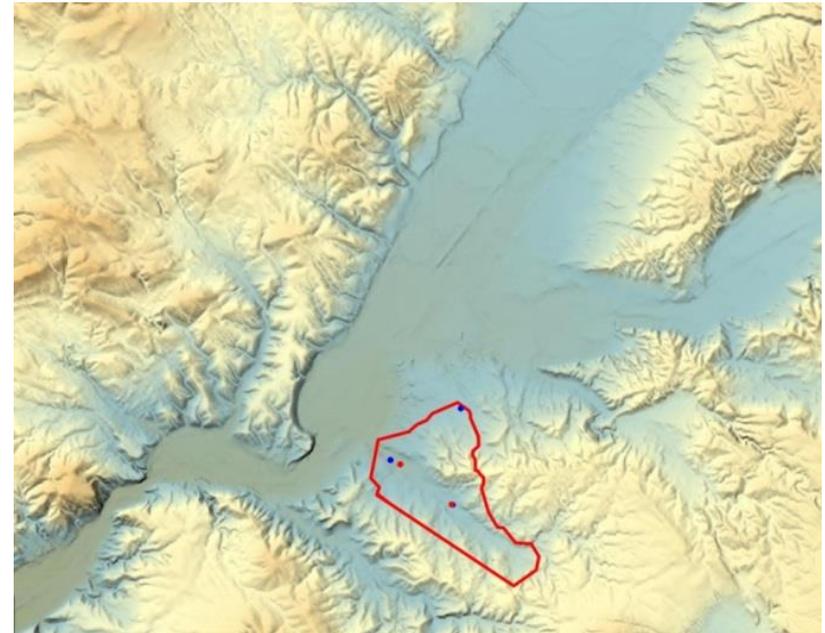
Laboratoire de Modélisation des Transferts dans l'Environnement – CEA

Journées Air et Radioactivité – 1^{er} et 2 février 2017

Motivation

Le LMTE doit évaluer le transport atmosphérique des rejets produits sur Cadarache pour l'étude de l'impact des installations de Cadarache.

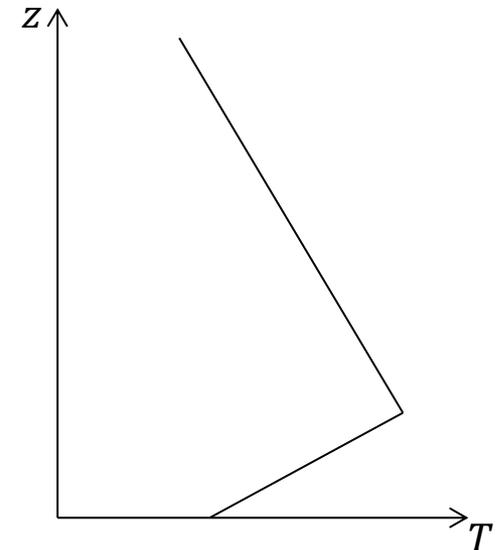
- Orographie très marquée
 - Vallée de la Durance (~5km)
 - Vallée de Cadarache (~1km)



Motivation

Le LMTE doit évaluer le transport atmosphérique des rejets produits sur Cadarache pour l'étude de l'impact des installations de Cadarache.

- Intérêt particulier pour les conditions stables (KASCADE, Duine 2015) qui sont fréquentes dans la région et qui sont les plus pénalisantes du point de vue de la dispersion des polluants



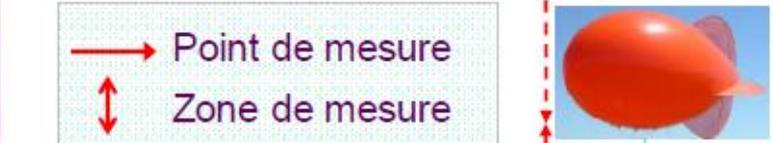
KASCAD E

Moyens Expérimentaux



5 000 m
Altitude
p/r au sol

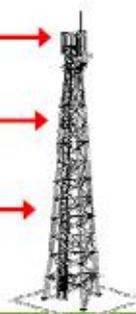
→ Point de mesure
↕ Zone de mesure



BC
Ballon captif
Prairie 219

M30 ou M10C
Prairie 219

M10
Mât LMTE
mobile



SOD ou MTK
SODAR mobile



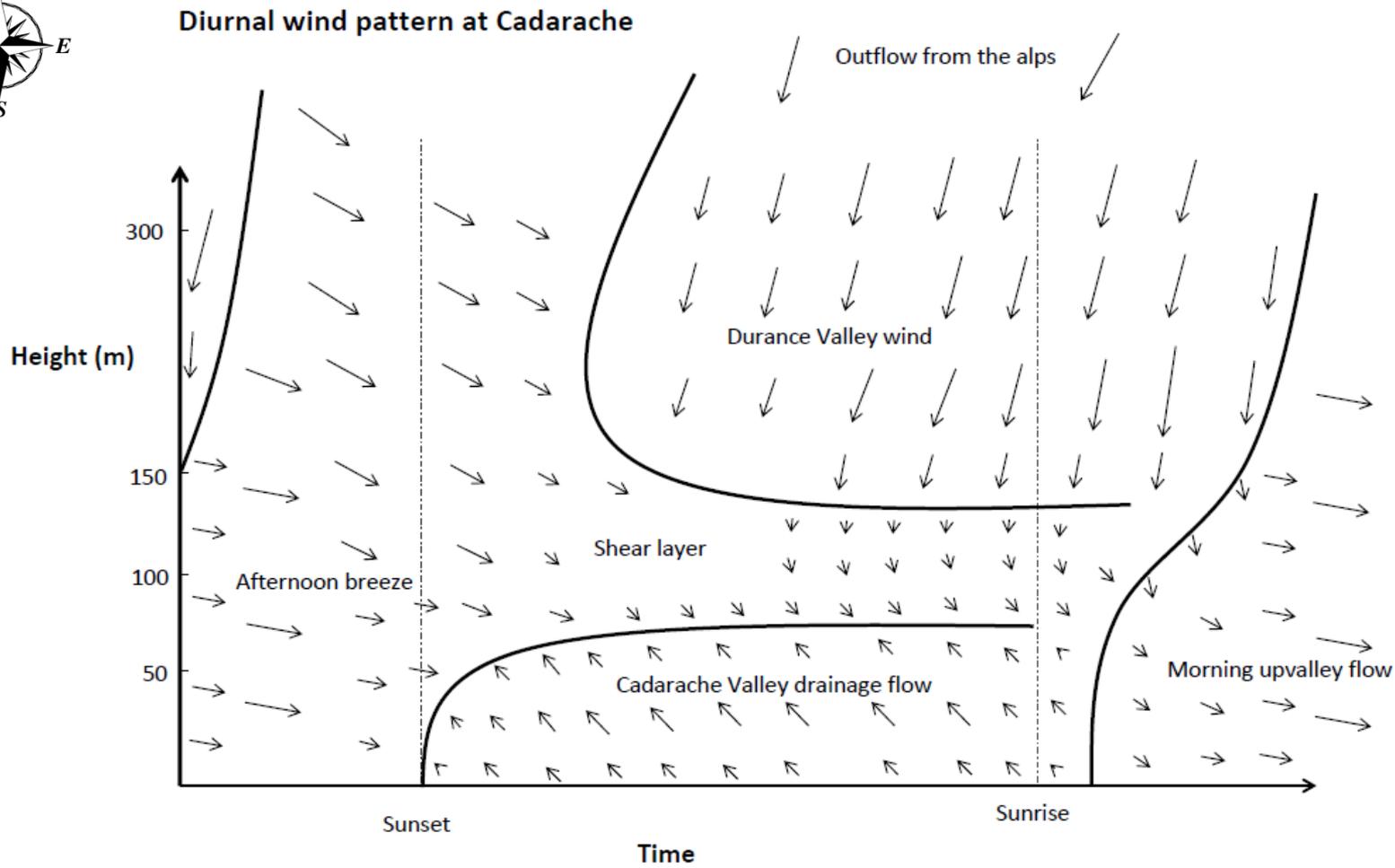
PTUaH



RS
Radiosondages
prairie 219

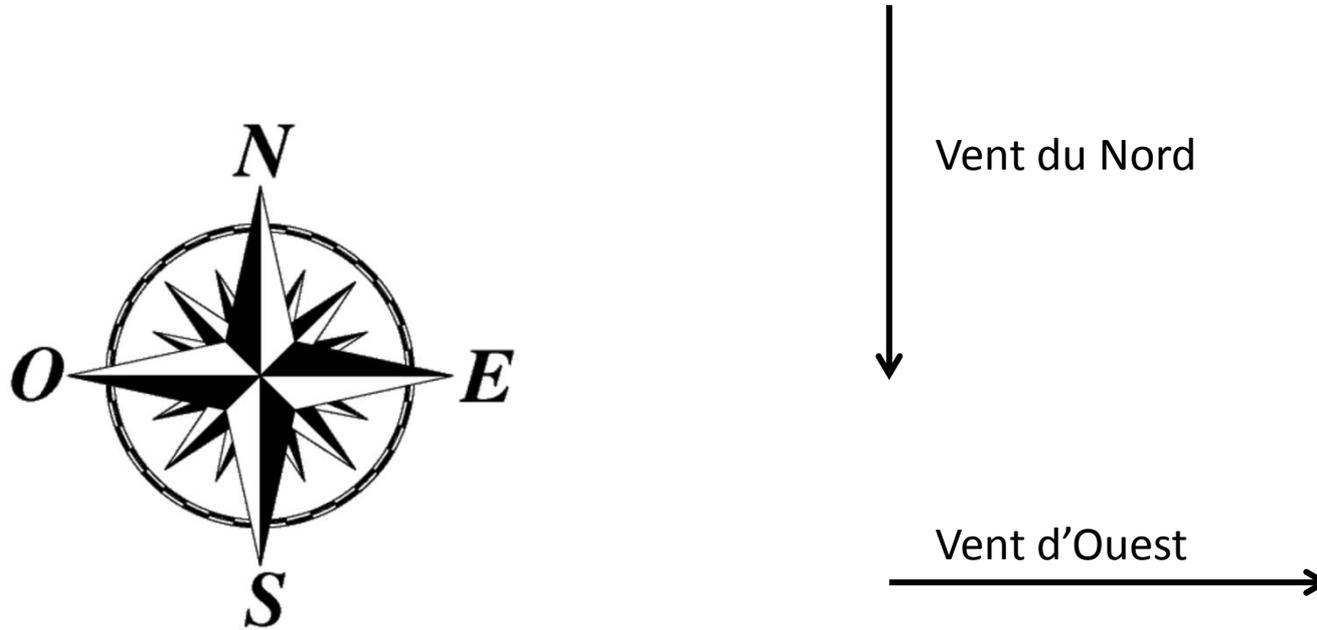


Thèse de Gert-Jan Duine (LA - CEA, 2012 - 2015)



Vents typiques rencontrés pendant la campagne de mesure KASCADE

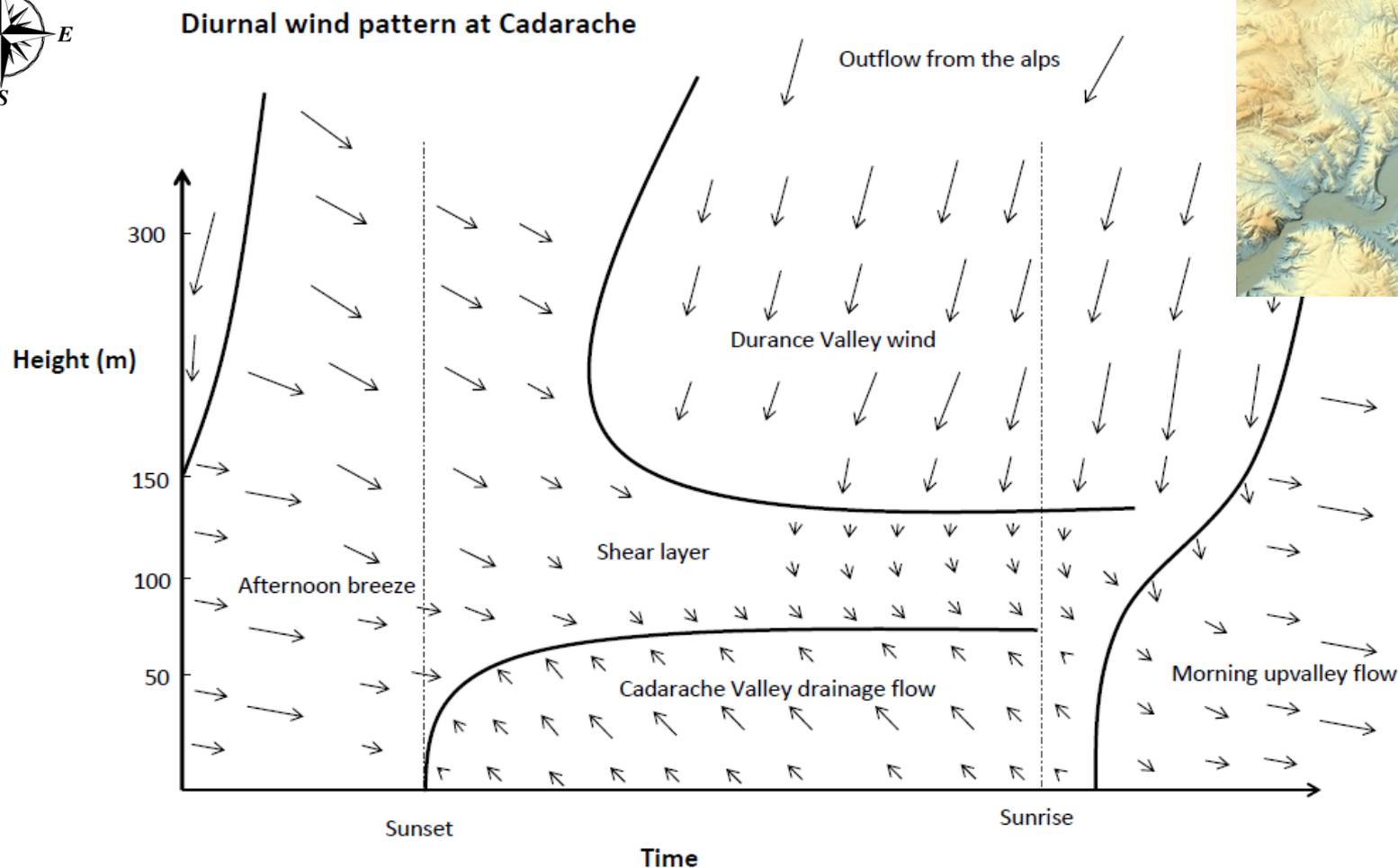
Thèse de Gert-Jan Duine (LA - CEA, 2012 - 2015)



Vents typiques rencontrés pendant la campagne de mesure KASCADE

Thèse de Gert-Jan Duine (LA - CEA, 2012 - 2015)

KASCADÉ



Vents typiques rencontrés pendant la campagne de mesure KASCADÉ



Thèse de Gert-Jan Duine (LA - CEA, 2012 - 2015)

Basée sur la campagne de mesure KASCADE, dédiée à l'étude des conditions stables sur Cadarache (décembre 2012 – mars 2013)

- Beaucoup de conditions stables observées pendant la nuit
- Création de vents thermiques par conditions stables dont les directions sont forcées par le relief
- Apparition et disparition du vent thermique de la vallée de Cadarache synchronisé avec le lever et coucher du soleil

→ Vents produits par des effets locaux

Dispersion atmosphérique

Les vents sur Cadarache dépendent fortement de phénomènes locaux (grande variabilité spatiale)

↳ Besoin de connaître un champ de vent 3D sur Cadarache pour calculer le transport atmosphérique

↳ Couplage WRF/FLEXPART

WRF (Weather Research and Forecasting): calcul météo

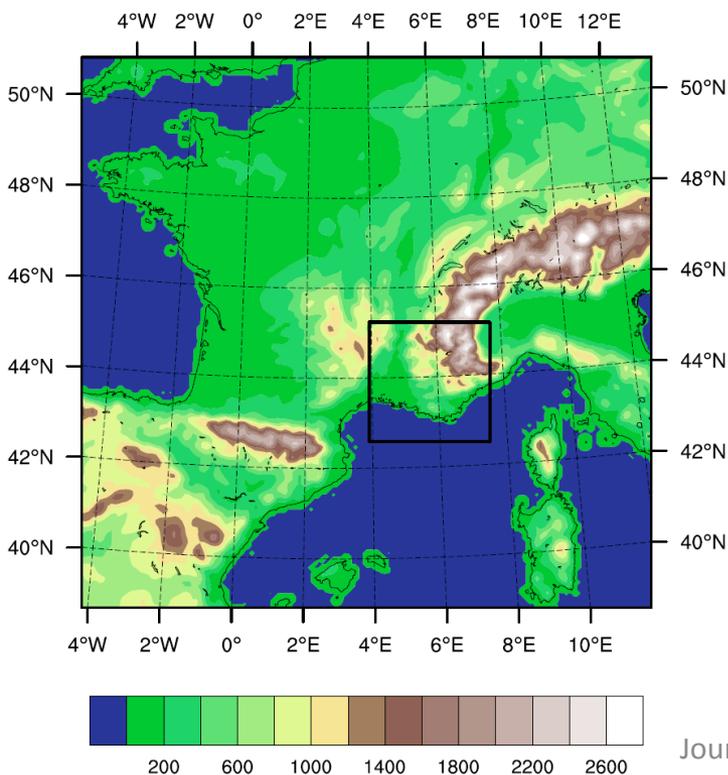
FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model): modèle lagrangien de calcul de dispersion atmosphérique

Prévisions WRF quotidiennes (MISTRAU)

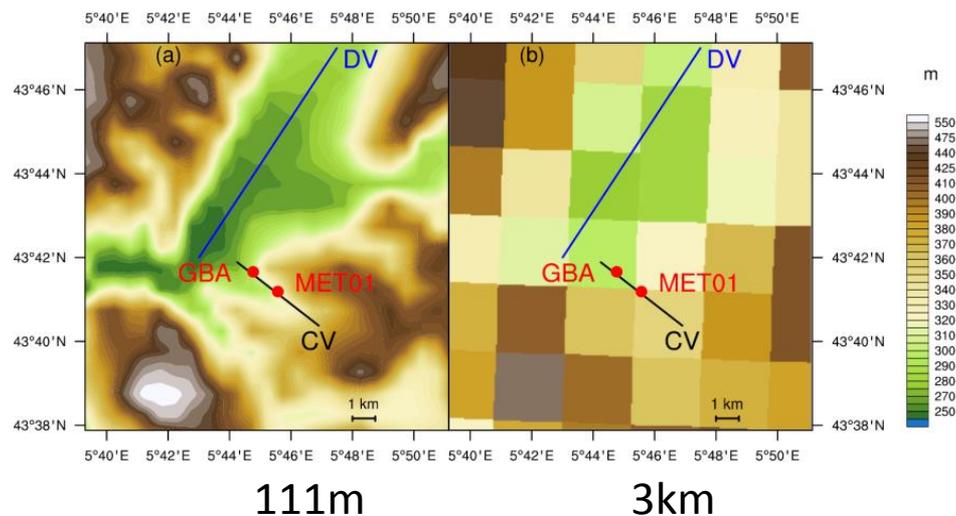
- Simulations effectuées quotidiennement
- Prévision à 4 jours
- Données d'entrées GFS à 0,25° de résolution

- 2 domaines imbriqués (9 et 3 km)

Topographie domaine à 9 km

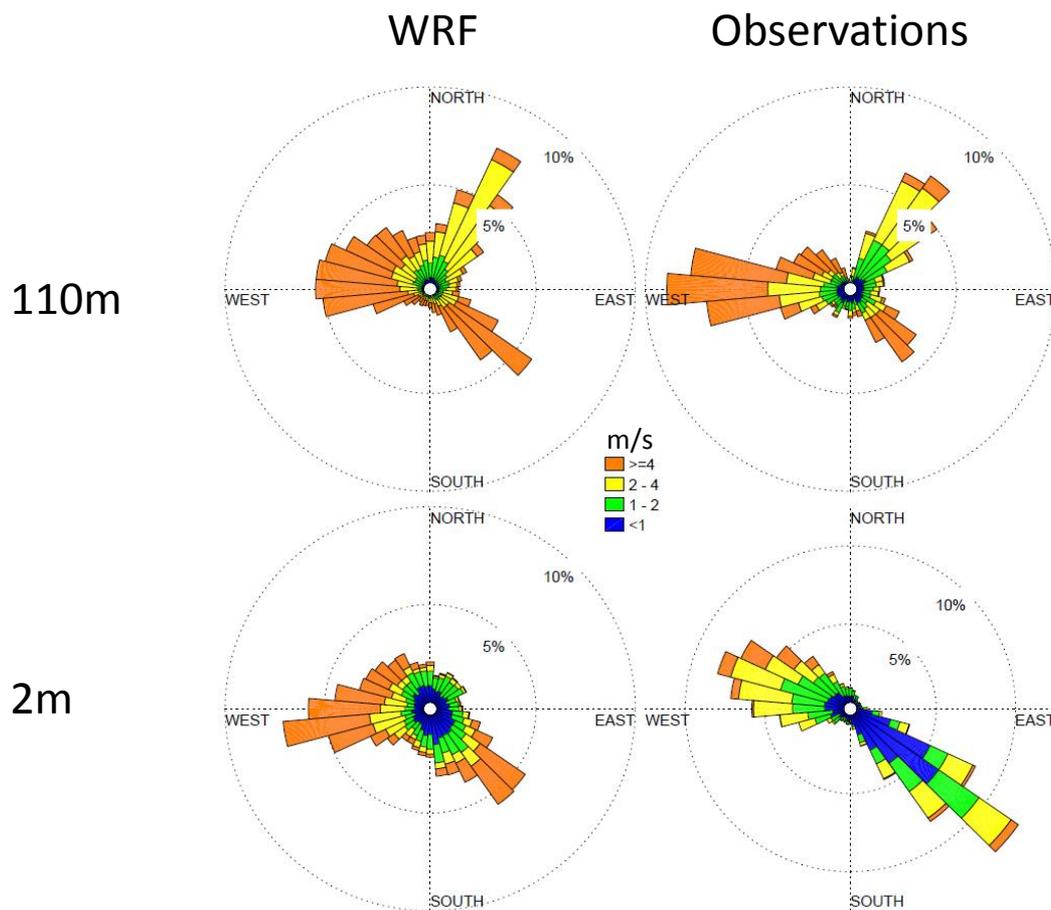


Zoom sur Cadarache (topographie)



Prévisions WRF 3 km : évaluation

Code WRF à 3km de résolution sur Cadarache (1 an de données)

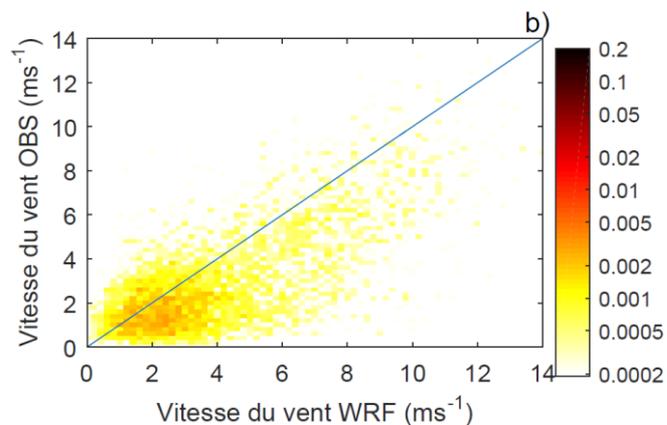
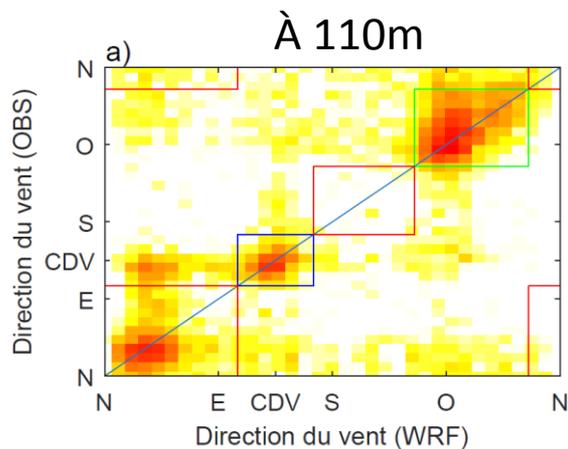


→ Bon accord au-dessus de la vallée de Cadarache

→ Moins bon accord dans la vallée de Cadarache

Prévisions WRF 3 km : évaluation

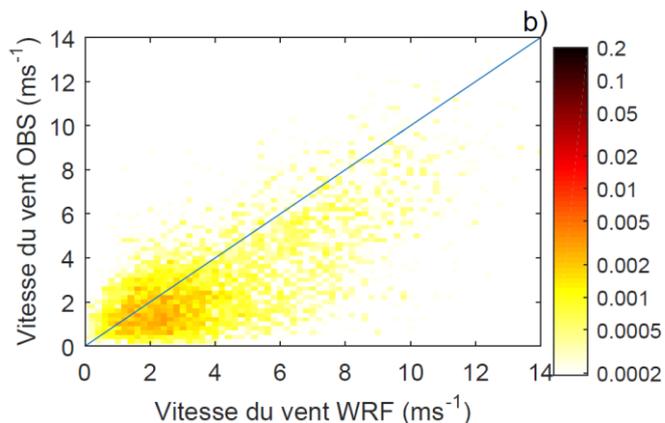
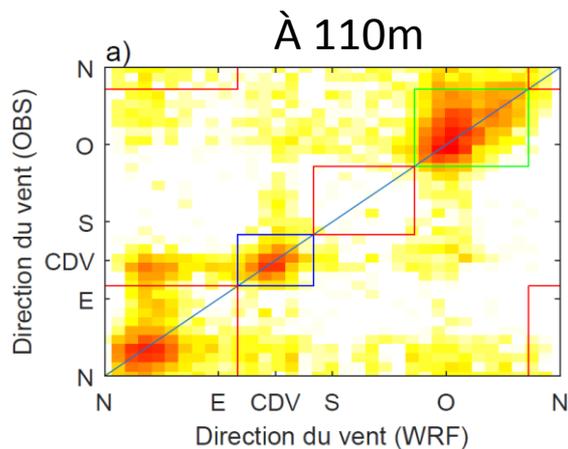
Code WRF à 3km de résolution sur Cadarache (1 an de données)



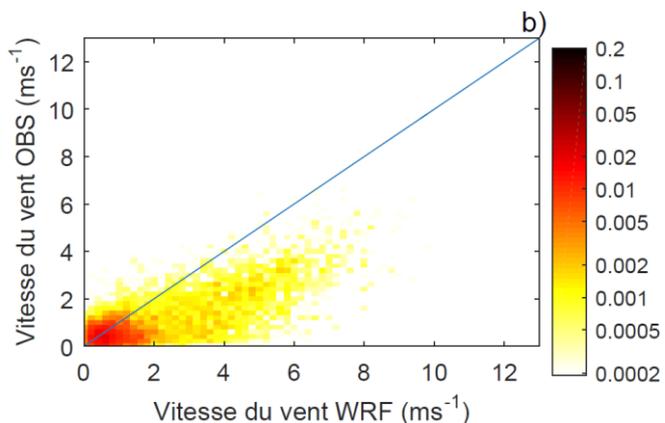
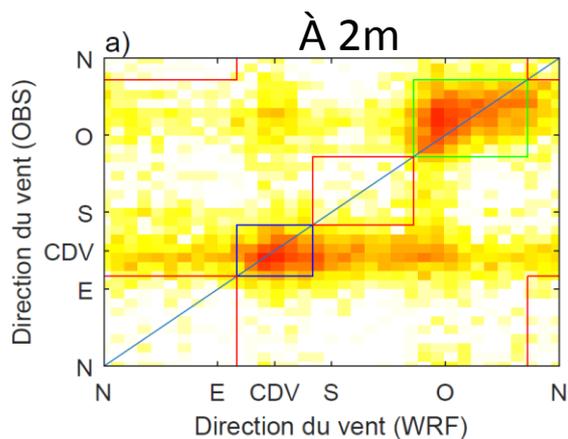
→ Bon accord au-dessus de la vallée de Cadarache

Prévisions WRF 3 km : évaluation

Code WRF à 3km de résolution sur Cadarache (1 an de données)



→ Bon accord au-dessus de la vallée de Cadarache



→ Moins bon accord dans la vallée de Cadarache

Prévisions WRF 1 km (Duine, 2015)

La vallée de Cadarache n'est pas représentée (1km de large)

Le vent thermique dans la vallée de Cadarache non plus

Le vent nocturne descendant la vallée de la Durance (≈ 5 km de large) est bien représenté

Besoin d'augmenter la résolution pour décrire la vallée de Cadarache

Augmentation de la résolution : 2 solutions

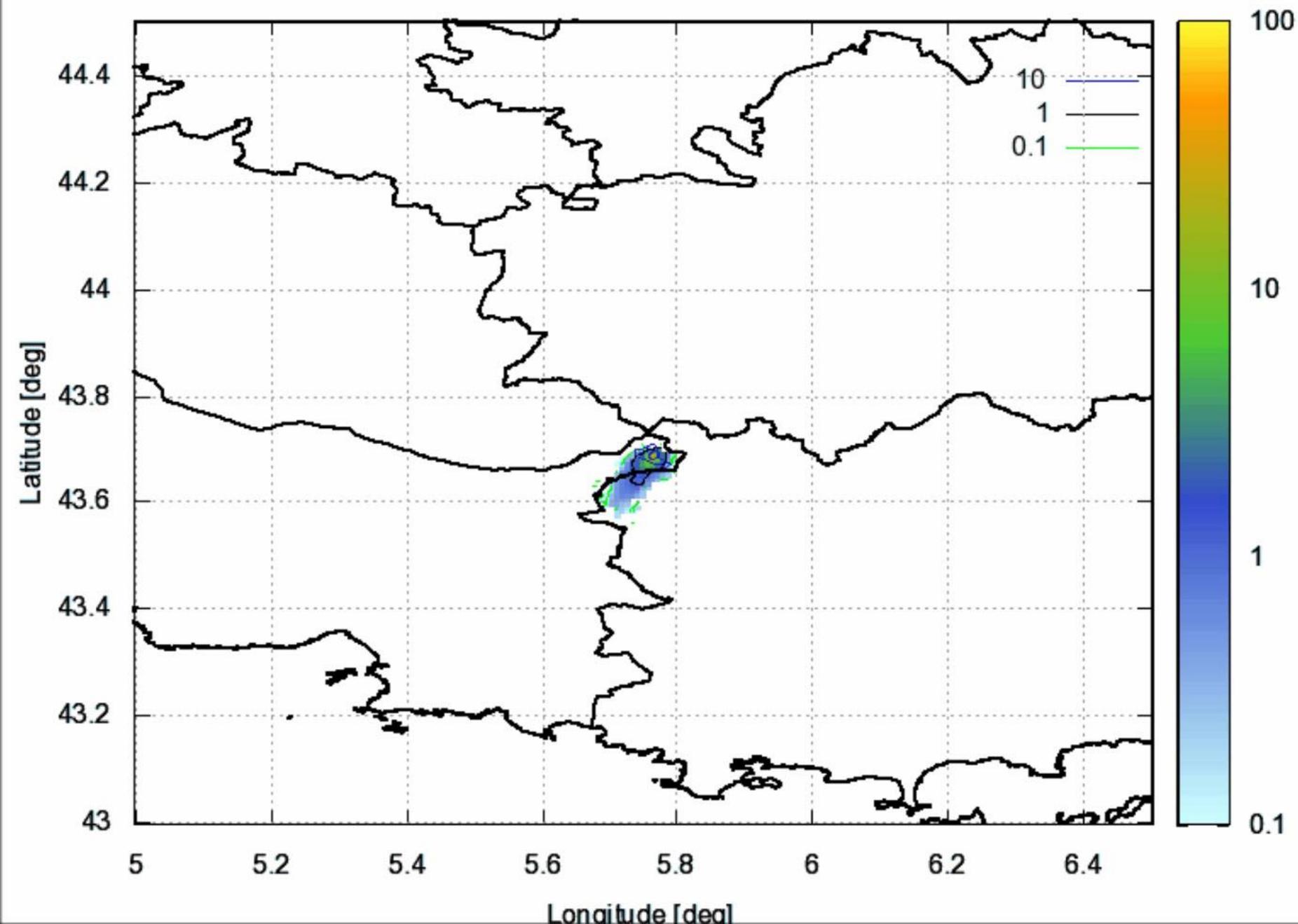
I. Meilleure prévision du champ de vent sur Cadarache avec WRF

→ simulations à haute résolution (≈ 100 m)

... pour ensuite faire tourner le modèle

de dispersion FLEXPART

Air concentration [Bq/m³] 2014-12-17 01:00:00



Augmentation de la résolution : 2 solutions

I. Meilleure prévision du champ de vent sur Cadarache avec WRF

→ simulations à haute résolution (≈ 100 m)

... pour ensuite faire tourner le modèle

de dispersion FLEXPART

II. Descente d'échelle statistique à partir des prévisions WRF à 3 km de résolution en utilisant un réseau de neurones artificiels (amélioration de la prévision du vent à 2 m en un point de la vallée de Cadarache)

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

- Très performants pour approximer n'importe quelle fonction non-linéaire entre des entrées et une sortie (Hornik et al., 1989)
- Utilisation assez répandue dans le cadre des études atmosphériques (Gardner and Dorling, 1998)
- Déjà utilisés avec succès pour calculer le module du vent:
(Philippopoulos and Deligiorgi, 2012; Cadenas and Rivera, 2009; More and Deo, 2003)

Absence d'utilisation pour le calcul de la direction du vent

Absence également d'utilisation basée sur des données issues de modélisation

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

1 jeu de données ponctuelles (observations du vent dans la vallée de Cadarache)

1 jeu de données continues (simulations WRF sur la même année)

$$\text{vent calculé} = f(\text{variables WRF})$$

Comparaison des vents calculés aux vents observés

Adaptation de la fonction f pour se rapprocher du vent observé

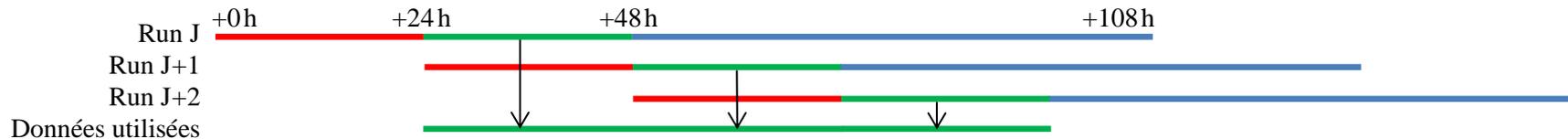
C'est l'apprentissage

Quand f est optimisée, on peut l'appliquer directement aux variables WRF sans avoir besoin des observations correspondantes

RNA – appliqué à WRF

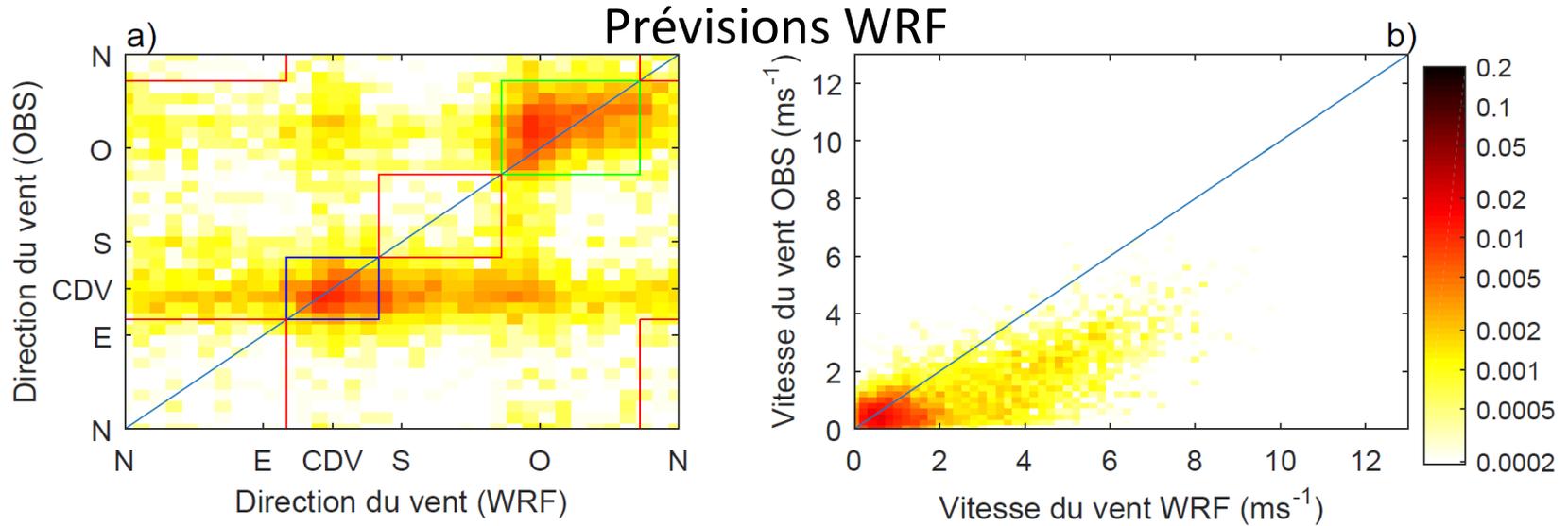
Apprentissage sur 1 an de données (17/02/2015 → 17/02/2016)

- Spin-up estimé à 24h
- Utilisation des prévisions de +24 à +48h

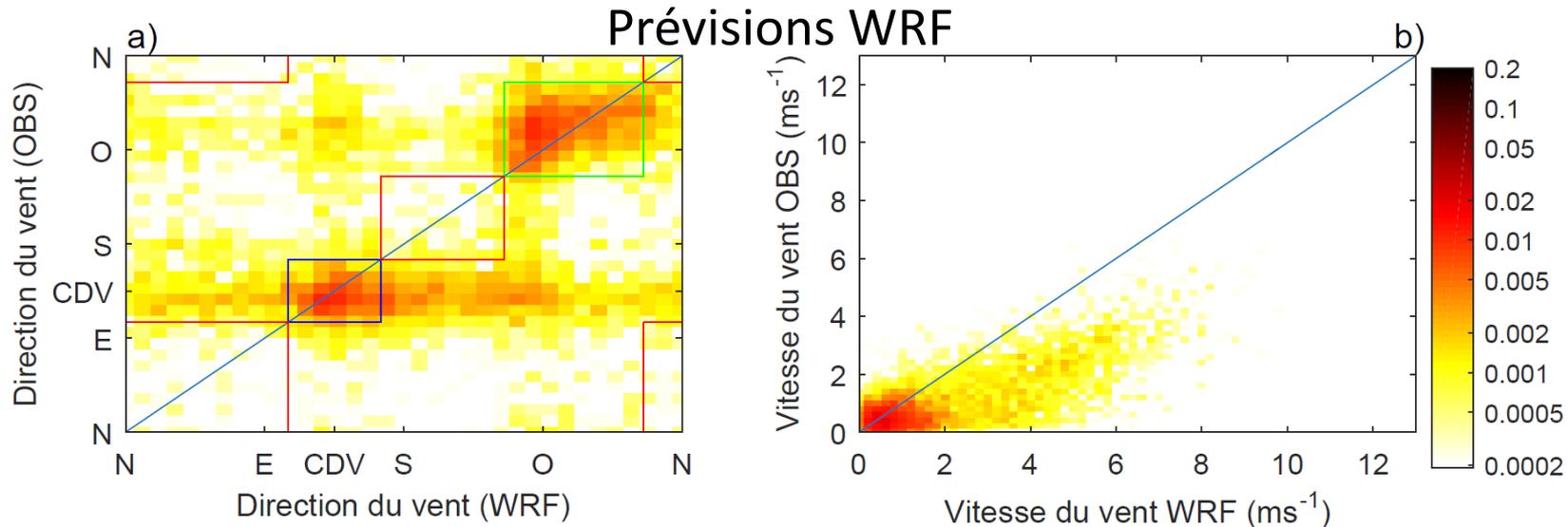


- spin-up
- +24h à +48h : données utilisées
- +48h à +108h : données non utilisées

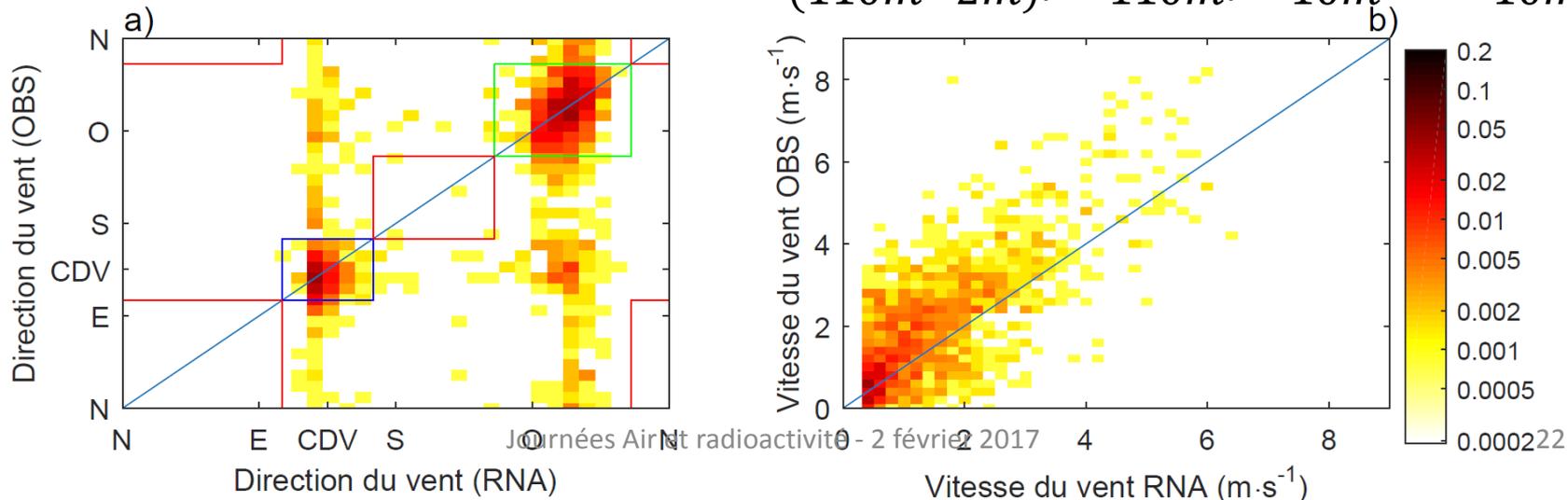
Réseau de Neurones Artificiels (WRF)



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

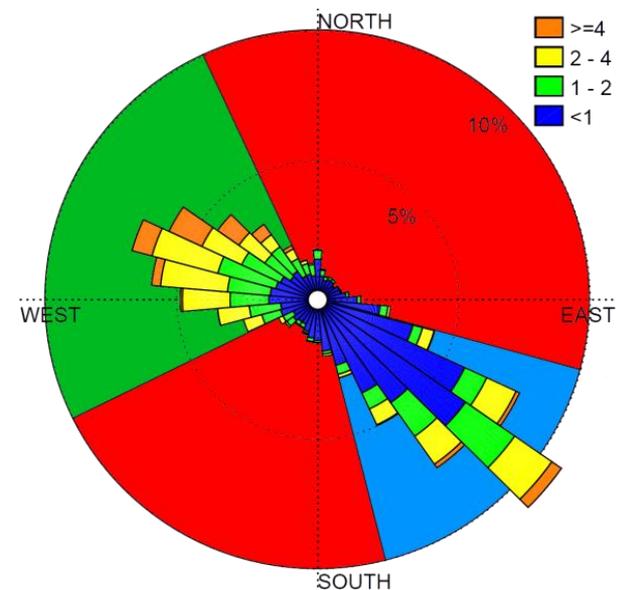
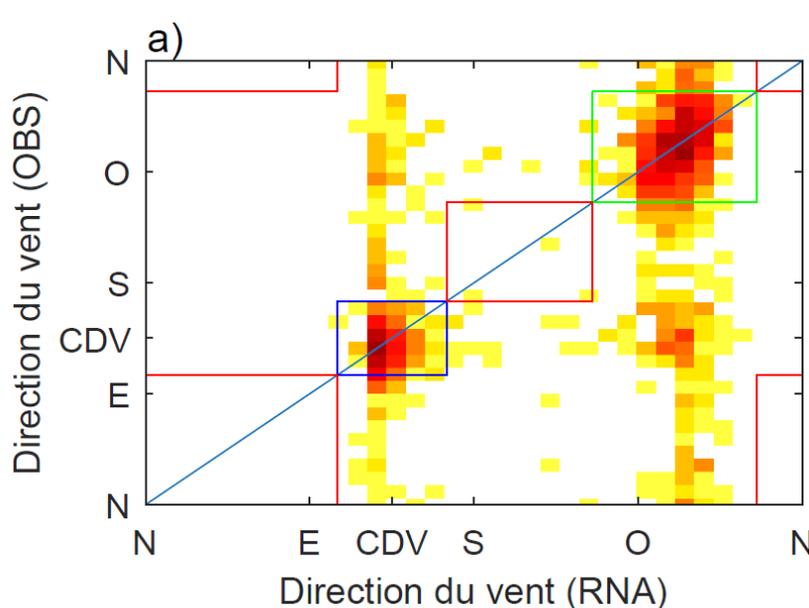


RNA avec 4 variables en entrée : $\Delta\theta_{(110m-2m)}$, U_{110m} , u_{10m} et v_{10m}



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

RNA avec 4 variables en entrée : $\Delta\theta_{(110m-2m)}$, U_{110m} , u_{10m} et v_{10m}

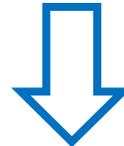


	DACC	PC3	Biais vit
WRF	0,55	0,50	+1,79 m/s
RNA	0,75	0,73	-0,46 m/s

Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

L'utilisation combinée de simulations WRF à méso-échelle et d'un réseau de neurones artificiels permet une descente d'échelle statistique convaincante pour la prévision d'un vent local

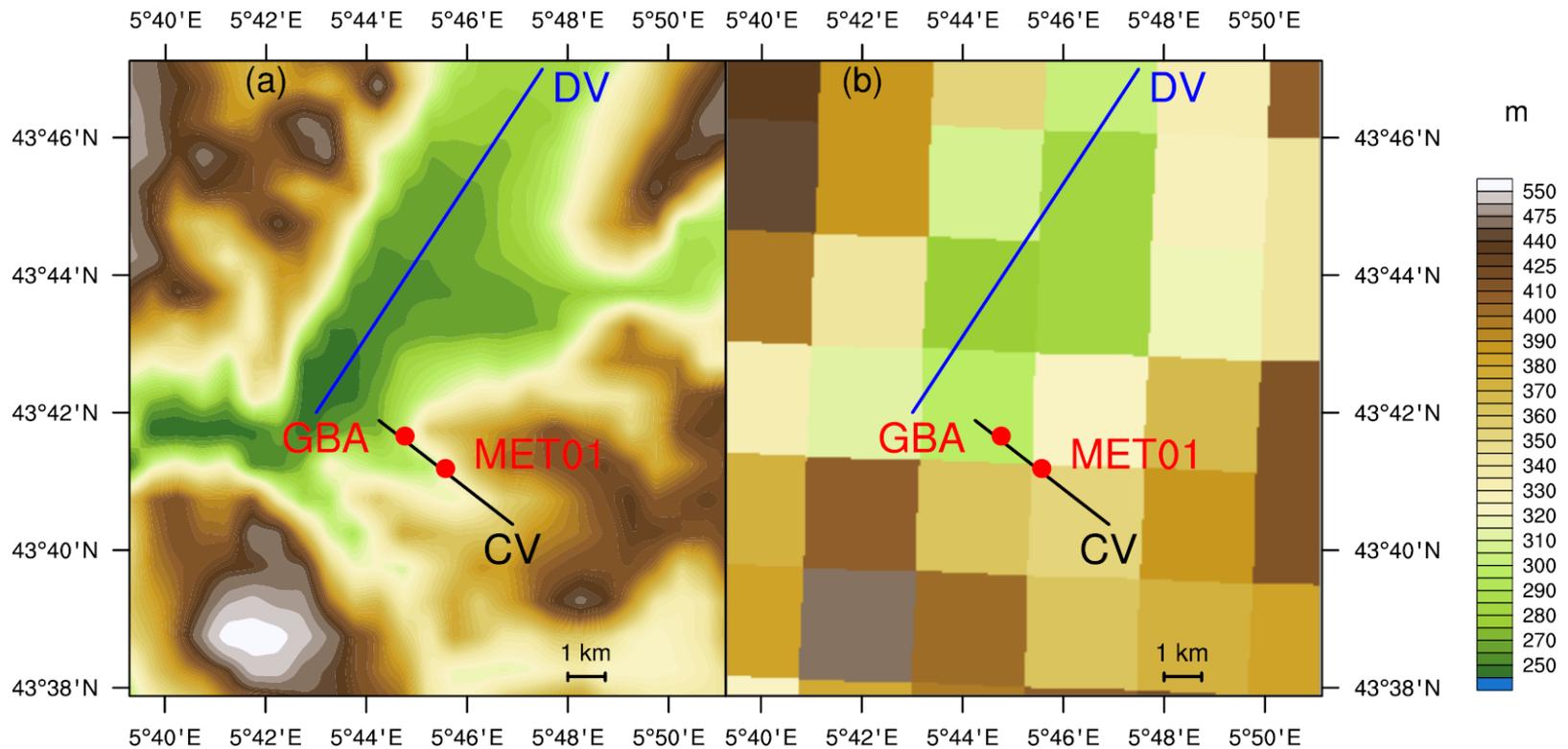
- Le réseau de neurones artificiels est capable de prévoir avec une bonne précision le vent dans la vallée de Cadarache à partir des simulations WRF.
- Cependant, cette prévision est limitée à un point dans la vallée de Cadarache
- Et la précision chute pour les vents faibles



Une prévision WRF est donc nécessaire pour prévoir le vent dans toute la vallée

WRF à fine échelle

Il faudrait atteindre une résolution d'environ 100 m pour décrire la vallée de Cadarache (1 km de large) et espérer reproduire le vent qui lui est associé



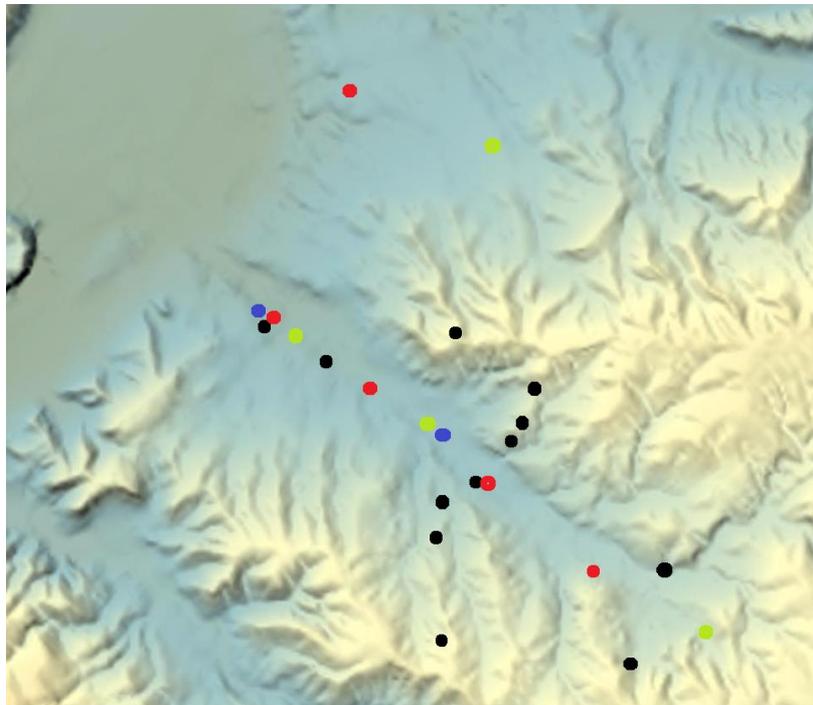
Représentation du relief sur la région de Cadarache dans WRF avec une résolution de 111m (a) et 3km (b)

KASCADE 2017 (01/2017 – 06/2017)



Spatialisation des mesures dans la vallée de Cadarache pour observer la formation et l'évolution du vent de vallée de Cadarache avec

- Radiosondages toutes les 3 heures
- Ballon captif instrumenté tous les 10m de la surface à 50m



- 12 stations LEMS



- 5 stations avec anémomètres soniques



- 4 stations CEA

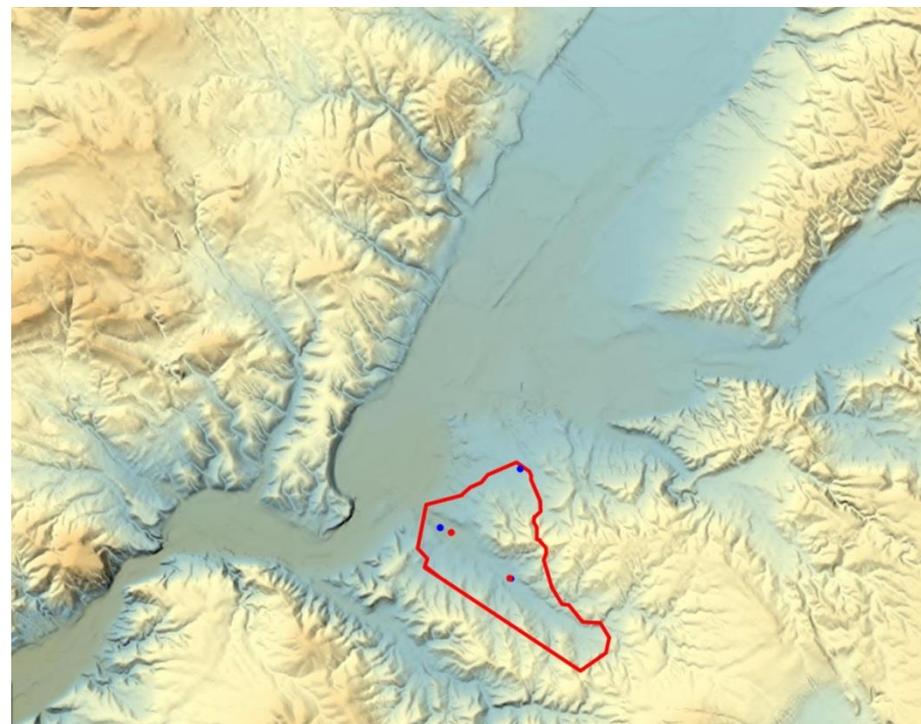


- 2 sodars

Merci pour votre attention

Observations

Au LMTE: mesures en continu disponibles



Station	Hauteur (agl)	Mesures	Dates
MET01	2 m	T, P, flux solaire, Rh, pluie vent (vitesse et direction)	depuis le 01/07/2014 01/07/2014 - 25/02/2016
GBA	2 m	P, T	en continu
	110 m	vent (vitesse et direction), Rh et T	
Sodar	de 75 m à 400 m	vitesse du vent	depuis 12/2012

Dispersion atmosphérique

Au LMTE: utilisation de modèles gaussiens (non compatibles avec la région)

- la complexité du relief n'est pas prise en compte
- la météorologie est très simplifiée

Objectif: utiliser un modèle plus performant et mieux adapté

- les modèles eulériens (coût de calcul élevé)
- les modèles lagrangiens (adaptés à la prévision opérationnelle)

→ Flexpart (qui nécessite la connaissance d'un champ de vent 3D)

Dispersion atmosphérique

WRF-FLEXPART (Brioude et al., 2013)

De nombreuses études traitent déjà de l'utilisation des champs de vent calculés par WRF dans FLEXPART

de Foy et al., 2009

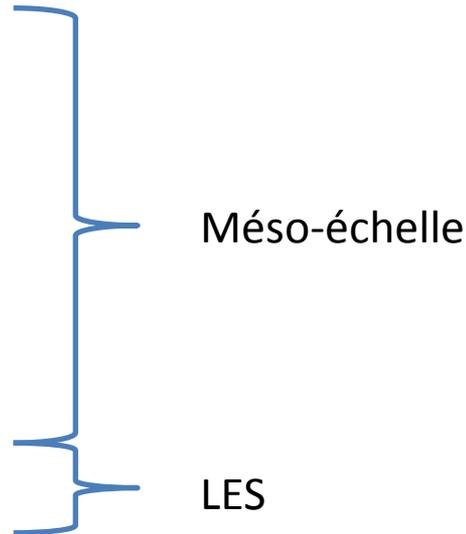
Angevine et al., 2013

Sandeepan et al., 2013

Heo et al., 2015

Madalaa et al., 2015

Cécé et al., 2016



Descente d'échelle statistique (Duine et al., 2016)

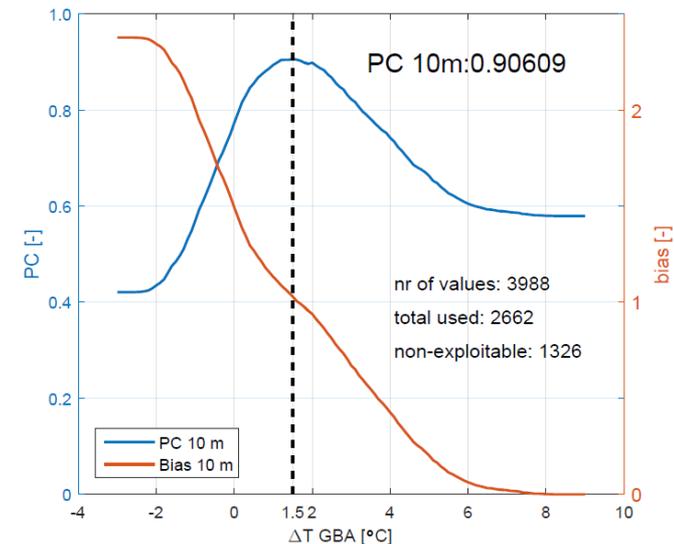
Nowcasting

L'objectif est de déterminer la présence d'un vent thermique descendant la vallée de Cadarache à partir de différentes observations faites dans la vallée

→ $\Delta T_{(110m-2m)}$, U_{110m} et Ri_B

Recherche d'un seuil pour chaque variable

→ Une valeur supérieure ou inférieure au seuil permet de différencier le type de vent



Données KASCADE (mesures moyennés à 30min à partir des données à 10min)

Meilleur seuil: $\Delta T_{(110m-2m)} = 1,5^{\circ}\text{C}$

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

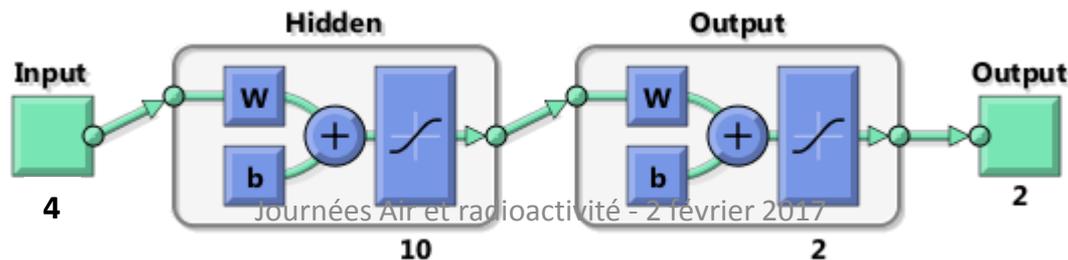
Calcul du vent à 2m par le RNA (sorties), par comparaison avec les observations de ce vent dans la vallée de Cadarache (cibles), à partir de plusieurs variables issues des simulations WRF (entrées).

$$\text{sortie} = f(\text{entrée})$$

L'objectif est de trouver f tel que la sortie se rapproche le plus possible de la cible

10 neurones cachés

2 sorties (composantes du vent à 2m en un point de la vallée)



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

16 variables WRF en entrée :

Stabilité/forçage synoptique:

- $\Delta\theta_{(110m-2m)}$
- hauteur de CL
- u^*
- Ri_B
- rayonnement net

Vent:

- direction et module du vent à plusieurs altitudes
- composantes du vent à 10m, 20m et 100m

Cycle journalier:

- heure
- heure par rapport au coucher/lever de soleil

La pression à la surface et l'humidité à 2m.

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

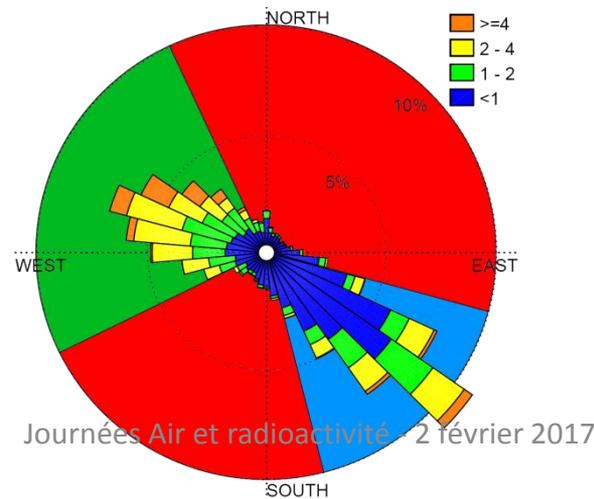
Évaluation de la performance

Composantes → coefficient de corrélation

Module → coefficient de corrélation, biais et erreur absolue moyenne

Directions →

- PC: fraction de vents bien classés (2 ou 3 classes)
- DACC: prévision correcte à $\pm 45^\circ$



RNA vs nowcasting (Duine et al., 2016)

Données de KASCADE

Nowcasting

PC2 = 0,80

RNA ($\Delta T_{(110m-2m)}$, U_{110m} , u_{110m} et v_{110m})

PC2 = 0,93

$R_u = 0,96$

PC3 = 0,89

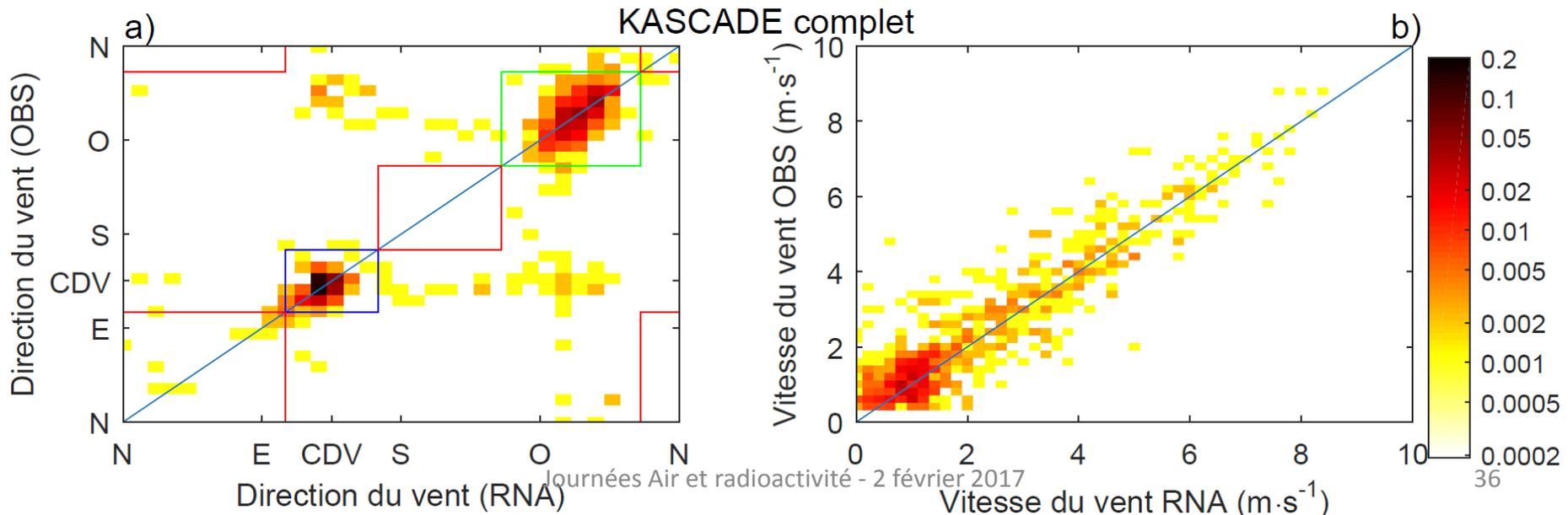
$R_v = 0,93$

DACC = 0,91

Biais(module) = -0,20 m/s

Rmodule = 0,92

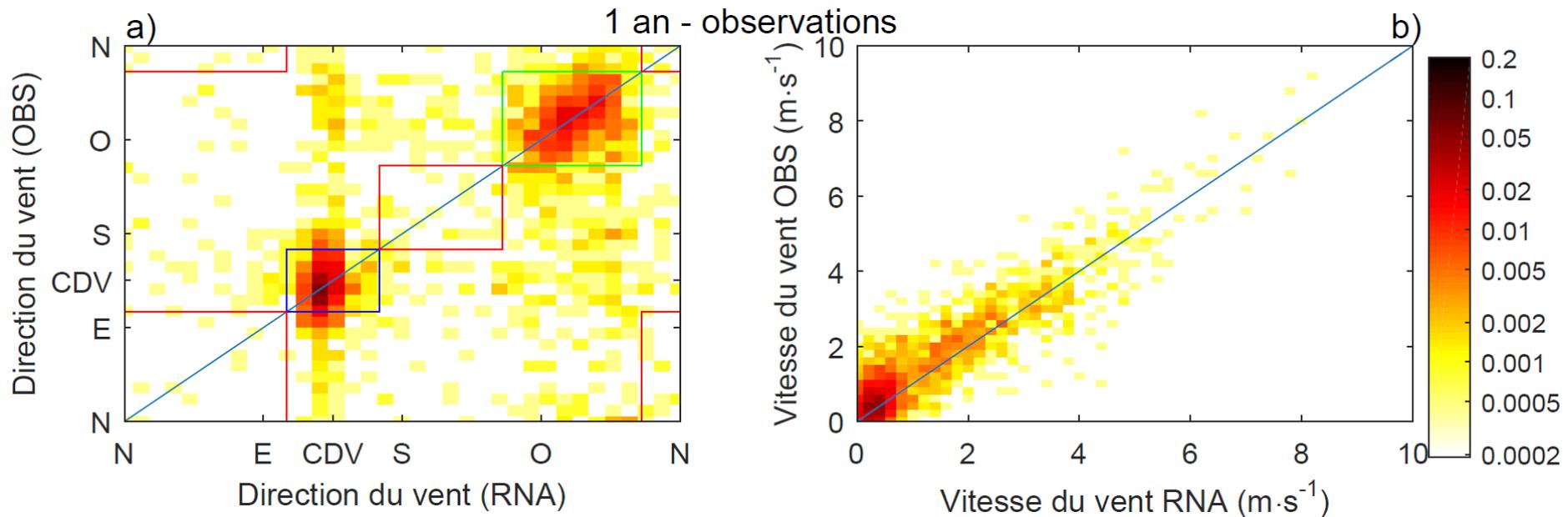
MAE(module) = 0,50 m/s



RNA – 1 an d'observations (17/02/2015 – 17/02/2016)

Plus uniquement appliqué à des conditions hivernales

Le nowcasting de Duine et al. (2016) donne un PC2 = 0,77



Baucoup de données mal prévues pour les vents très faibles

	DACC	PC2	PC3	Ru	Rv	R vit	Biais vit	MAE vit
1an	0,74	0,83	0,69	0,92	0,83	0,89	-0,23 m/s	0,46 m/s
>0,5	0,86	0,91	0,81	0,93	0,86	0,89	-0,17 m/s	0,50 m/s

RNA

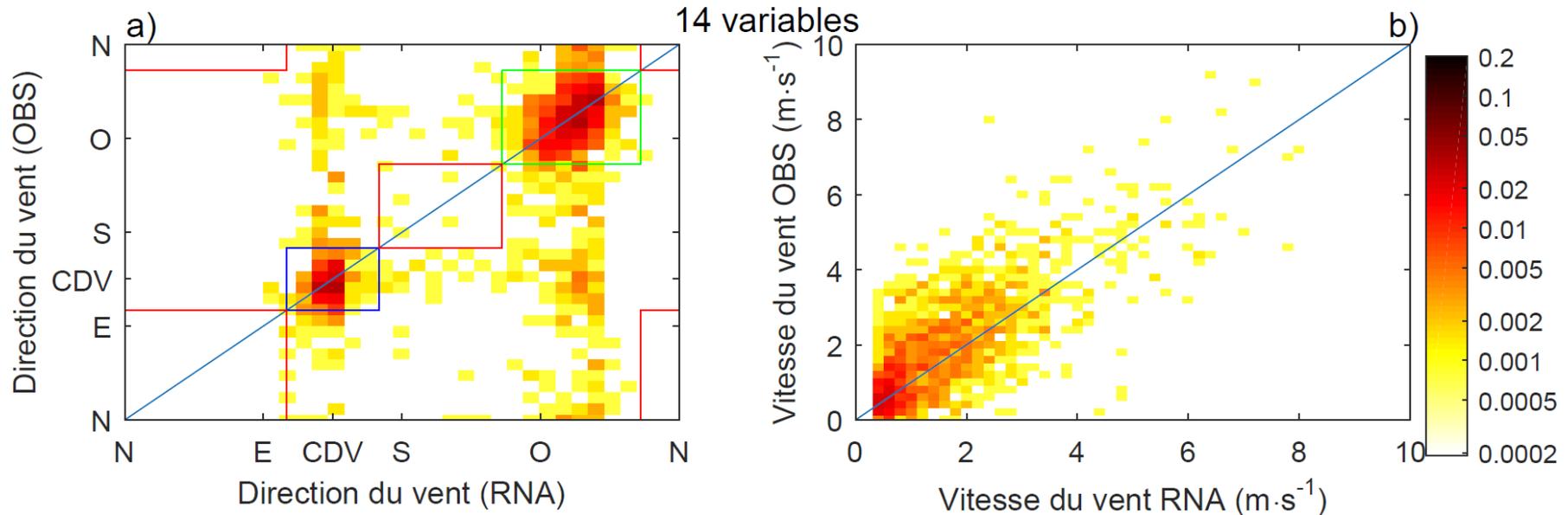
Donc le RNA est un bon outil pour calculer statistiquement le vent en un point de la vallée de Cadarache

→ **Application aux simulations WRF à 3 km de résolution**

Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

2 étapes de sélection des variables

Il ne reste plus que 14 variables après la première étape de sélection



	DACC	PC2	PC3	Ru	Rv	R vit	Biais vit	MAE vit
WRF	0,55	0,65	0,50	0,70	0,59	0,72	+1,79 m/s	2,00 m/s
RNA ₁₄	0,77	0,83	0,73	0,80	0,71	0,74	-0,29 m/s	0,76 m/s

Prévisions WRF 3 km : évaluation

Mesure du vent à 110m vs vent WRF à 110m

Mesure du vent à 2m vs vent WRF à 110m

Conversion module 10m → 2m avec les données KASCADE

Calcul z_0

Données corrigée par Gert-Jan moyennées sur 30min

suppression des vents $V_{2m} > V_{10m}$

je ne garde que les conditions neutres: $-2^{\circ}\text{C} < \Delta T < 0^{\circ}\text{C}$

Je prends la médiane des valeurs de z_0 calculées entre:

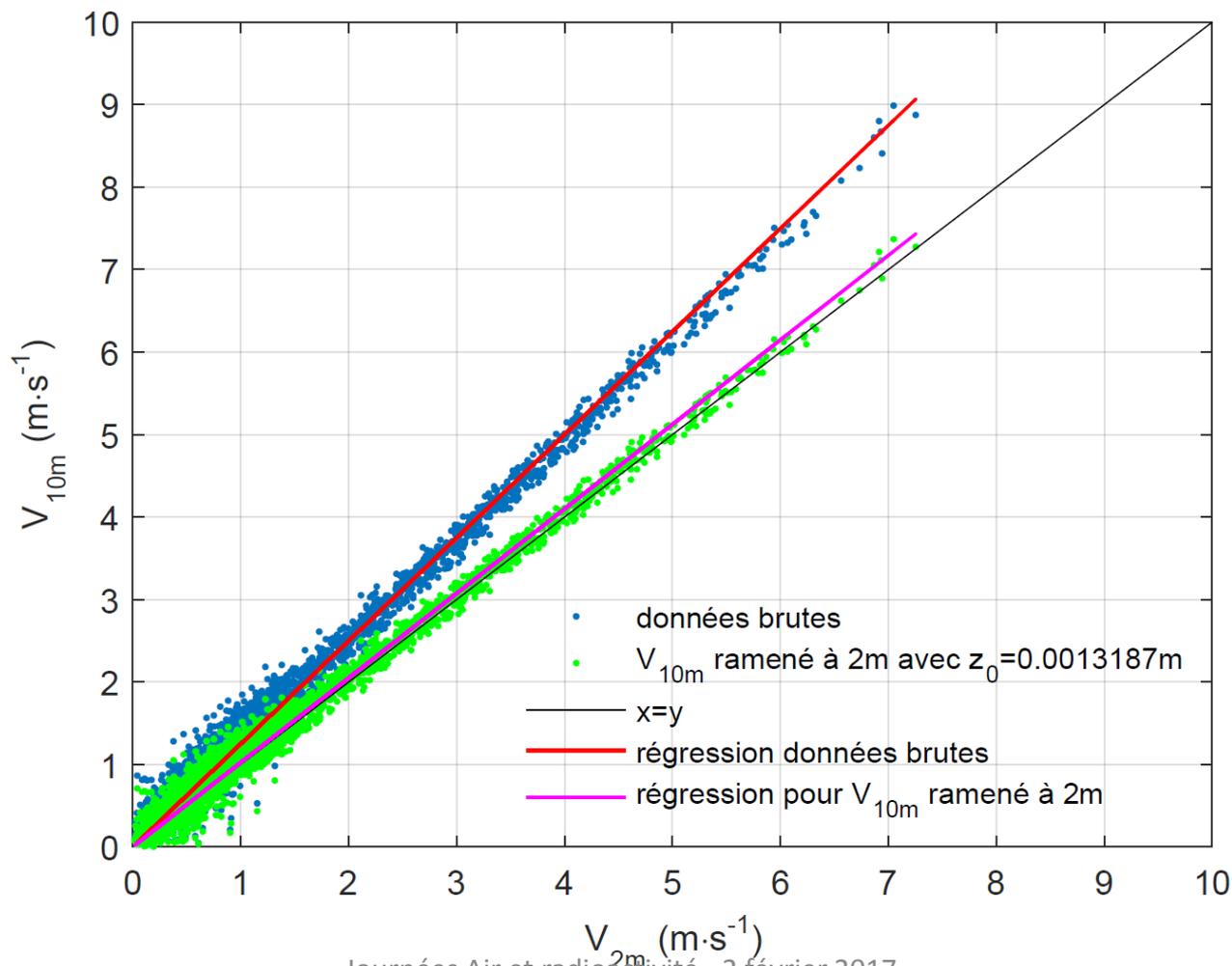
2m et 10m = 0,132cm

10m et 30m = 2,97cm

2m et 30m = 0,156cm

**Faibles valeurs pour une prairie
avec quelques arbres**

Prévisions WRF 3 km : évaluation

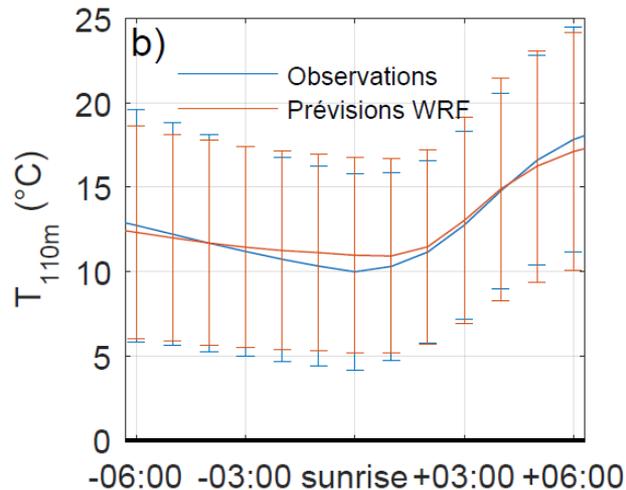
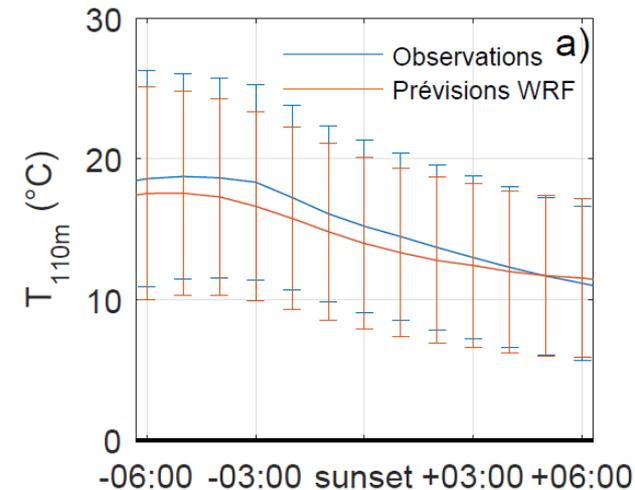


Prévisions WRF 3 km : évaluation

Comparaison températures

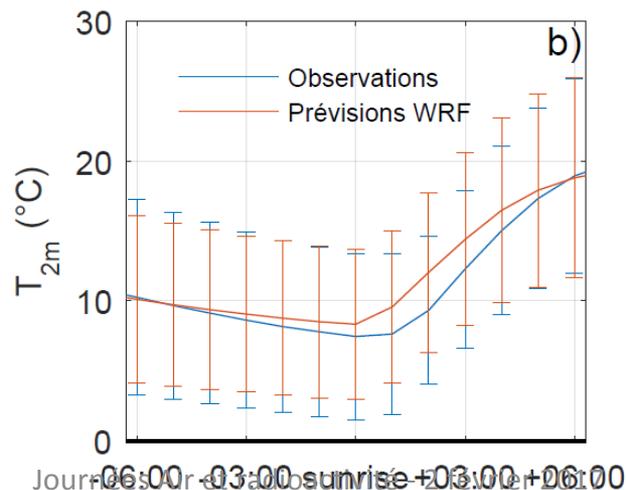
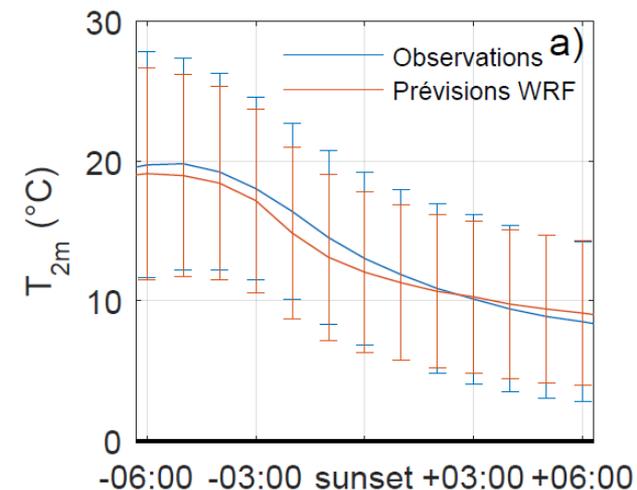
Prévisions WRF 3 km : évaluation

Températures à 2m et 110m



Lissage des cycles journaliers
avec des maxima simulés
inférieurs aux observations

À 110m: biais = $-0,39^{\circ}\text{C}$
MAE = $1,78^{\circ}\text{C}$

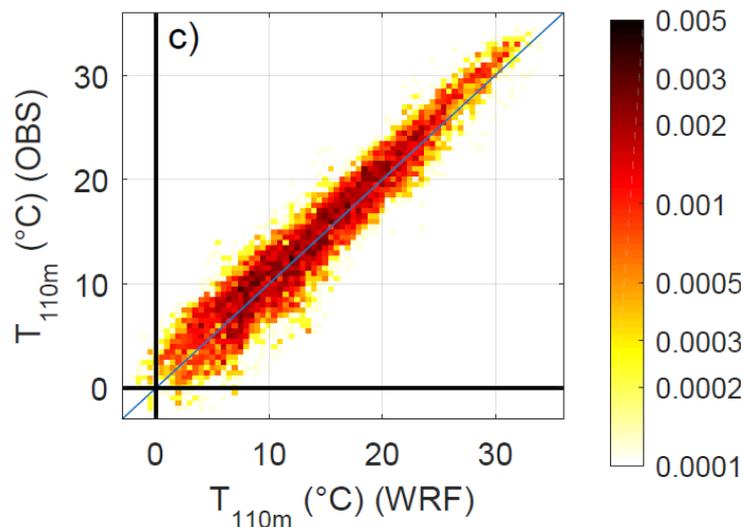


À 2m: biais = $+0,17^{\circ}\text{C}$
MAE = $2,06^{\circ}\text{C}$

Déphasage au lever du soleil

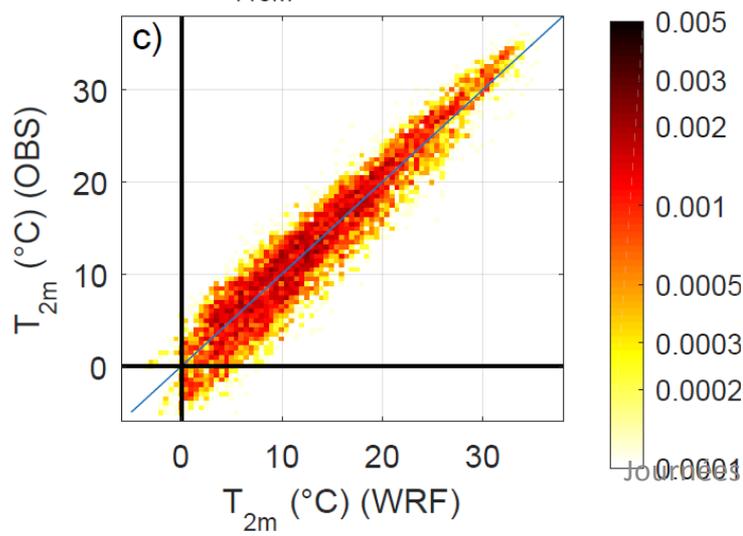
Prévisions WRF 3 km : évaluation

Températures à 2m et 110m



Lissage des cycles journaliers
avec des maxima simulés
inférieurs aux observations

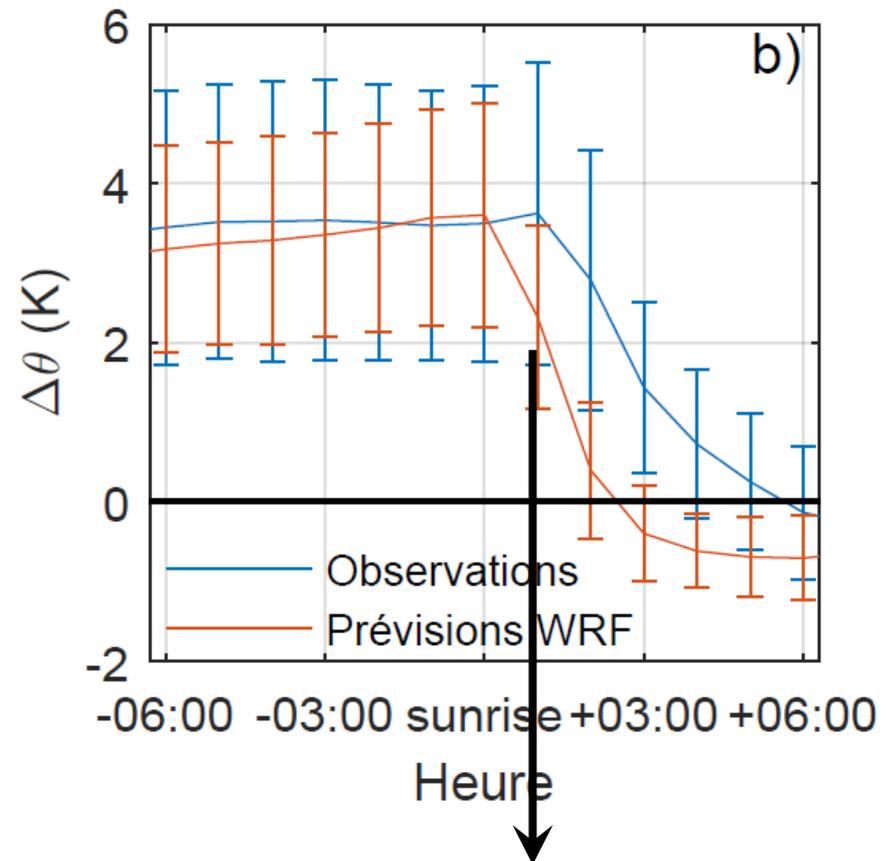
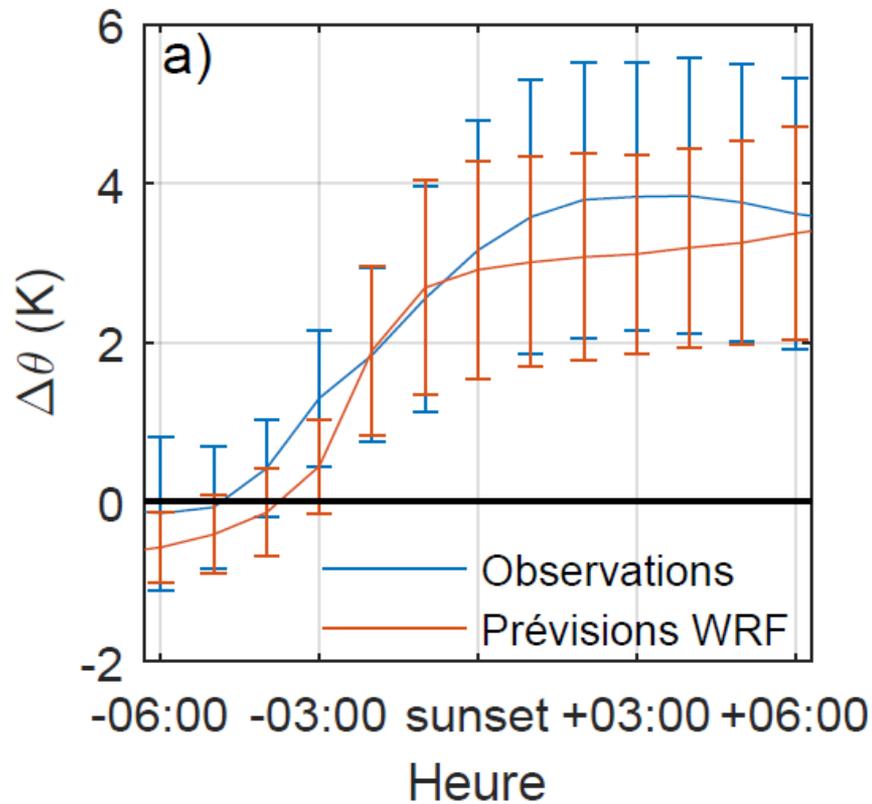
À 110m: biais = $-0,39^{\circ}\text{C}$
MAE = $1,78^{\circ}\text{C}$



À 2m: biais = $+0,17^{\circ}\text{C}$
MAE = $2,06^{\circ}\text{C}$

Prévisions WRF 3 km : évaluation

Différence de température potentielle entre 110m et 2m

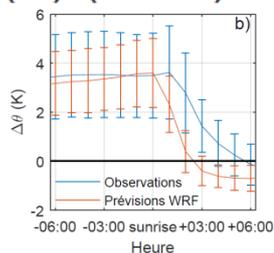
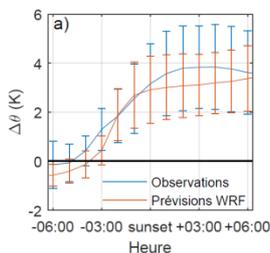
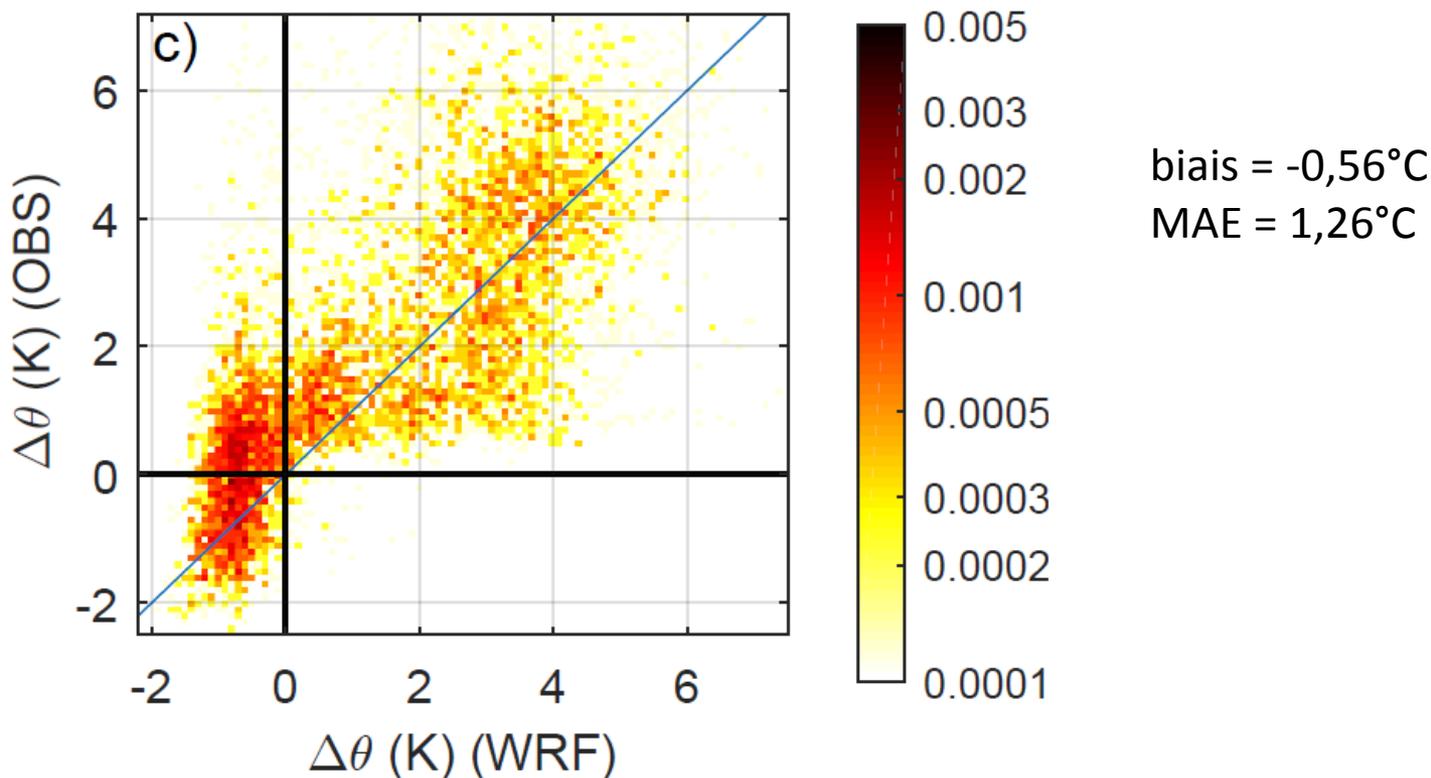


Stabilité constamment plus forte dans les observations

1h de décalage dans la diminution de la stabilité
→ décalage dans la température à 2m

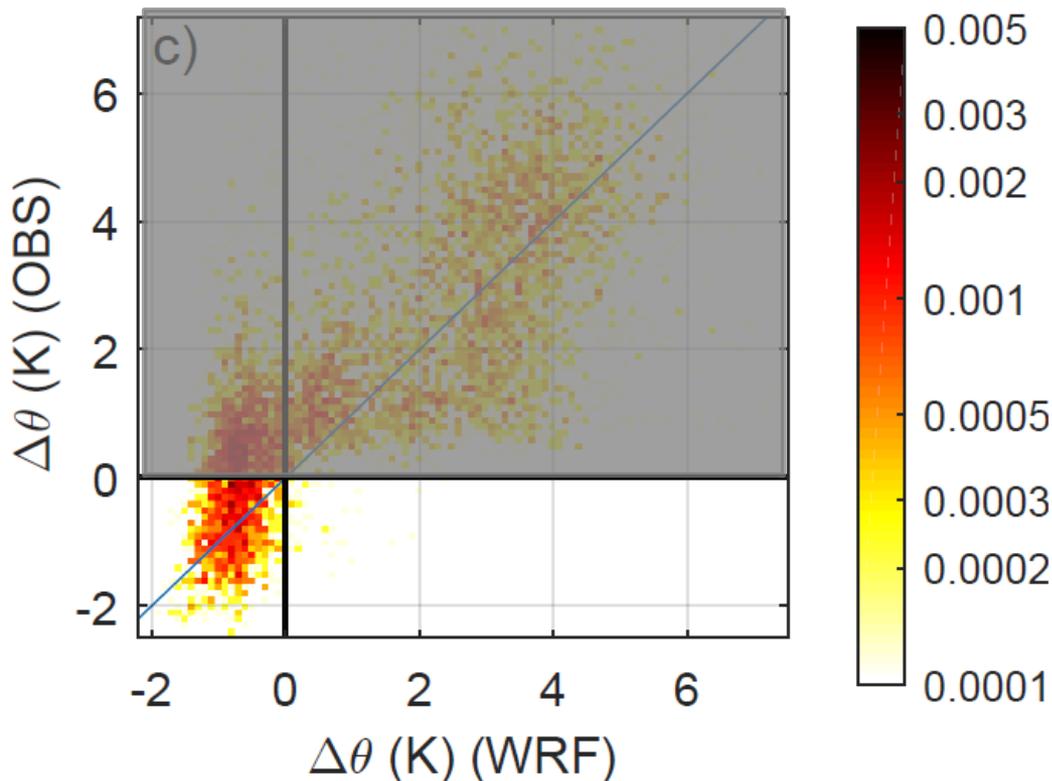
Prévisions WRF 3 km : évaluation

Différence de température potentielle entre 110m et 2m



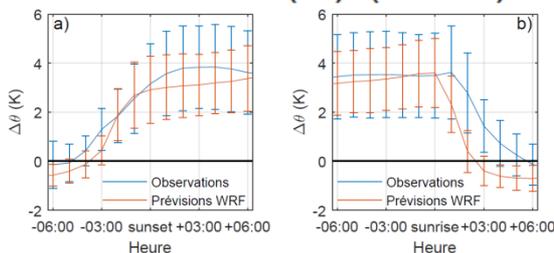
Prévisions WRF 3 km : évaluation

Différence de température potentielle entre 110m et 2m



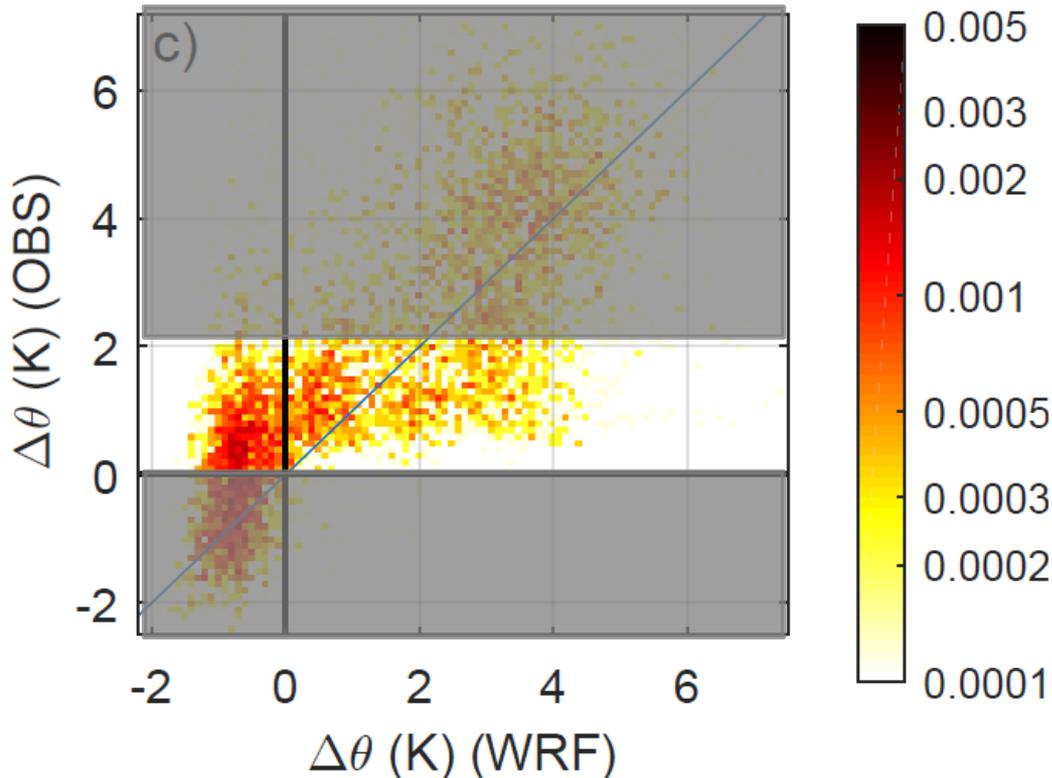
Pour les conditions instables
(observées le jour)

→ Plutôt bonne prévision



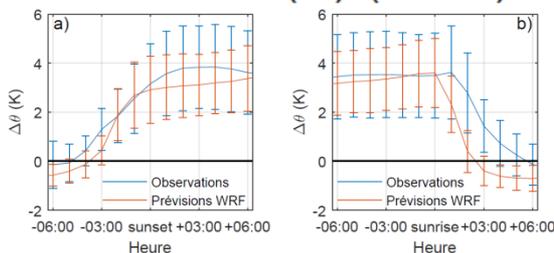
Prévisions WRF 3 km : évaluation

Différence de température potentielle entre 110m et 2m



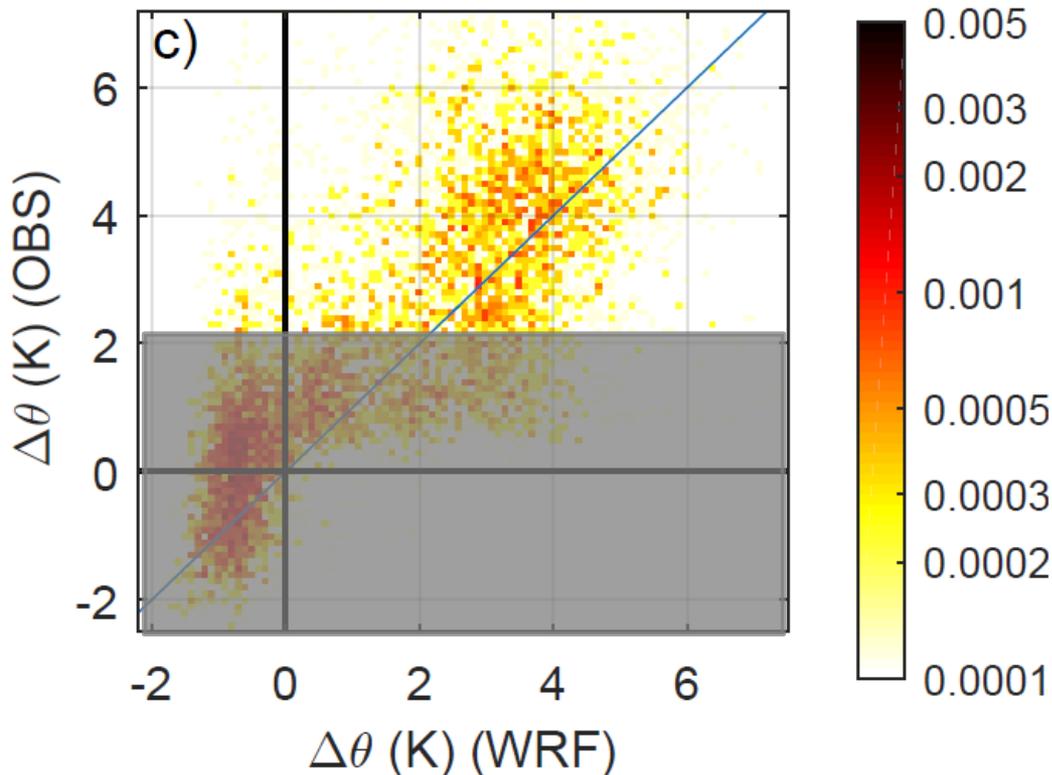
Pour les $0\text{K} < \Delta\theta < 2\text{K}$
(observées quelques heures
avant le coucher du soleil et
quelques heures après le lever
du soleil)

→ Assez mauvaises prévisions,
qui produisent beaucoup trop
de conditions instables



Prévisions WRF 3 km : évaluation

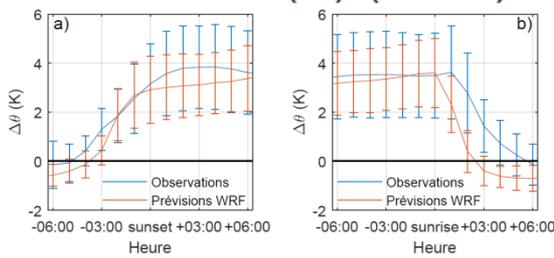
Différence de température potentielle entre 110m et 2m



Pour les $\Delta\theta > 2K$
(observées la nuit)

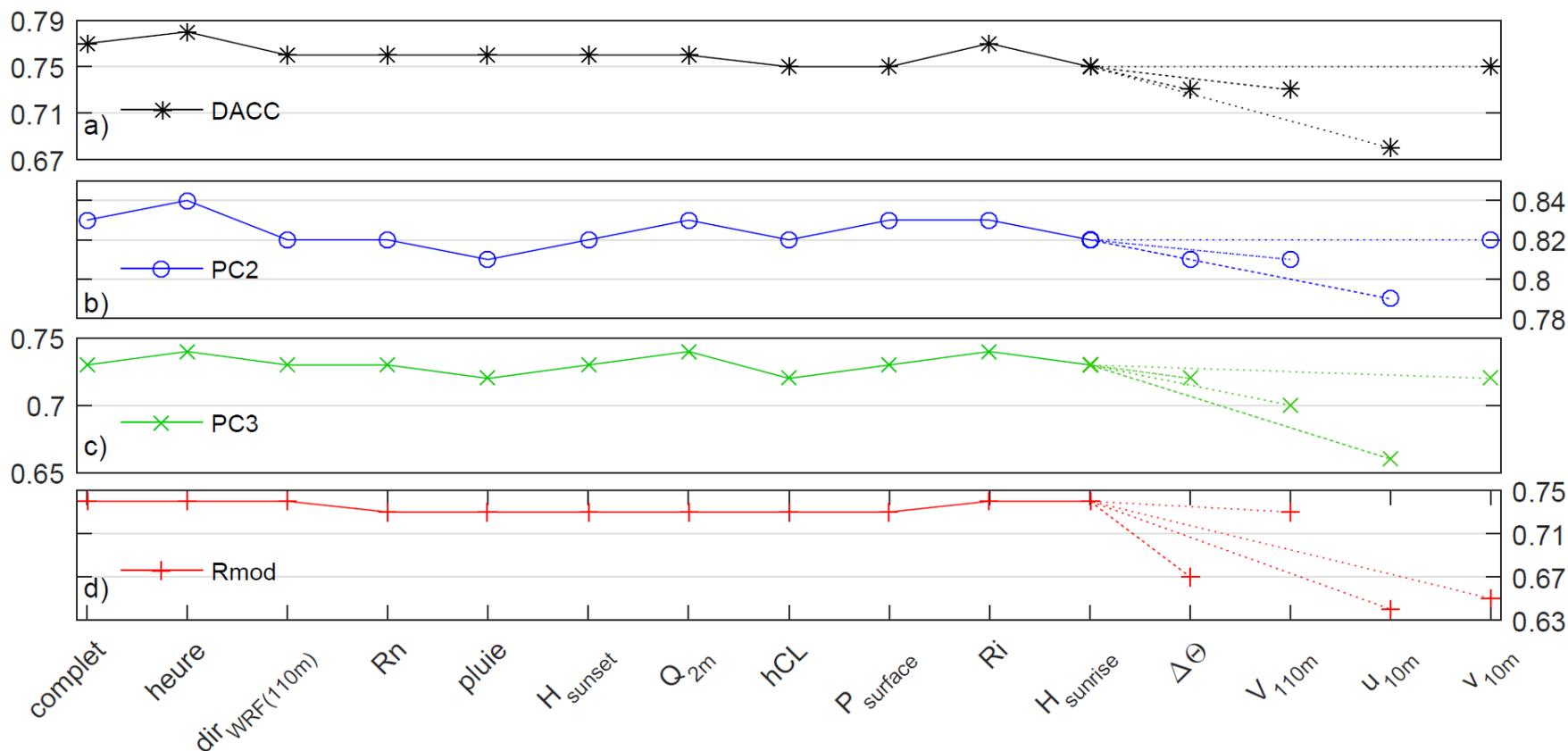
→ Les prévisions produisent
bien des conditions stables

→ Mais problèmes d'intensité



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

2^{ème} étape: élimination des variables les moins significatives



Au final, il reste 4 variables:

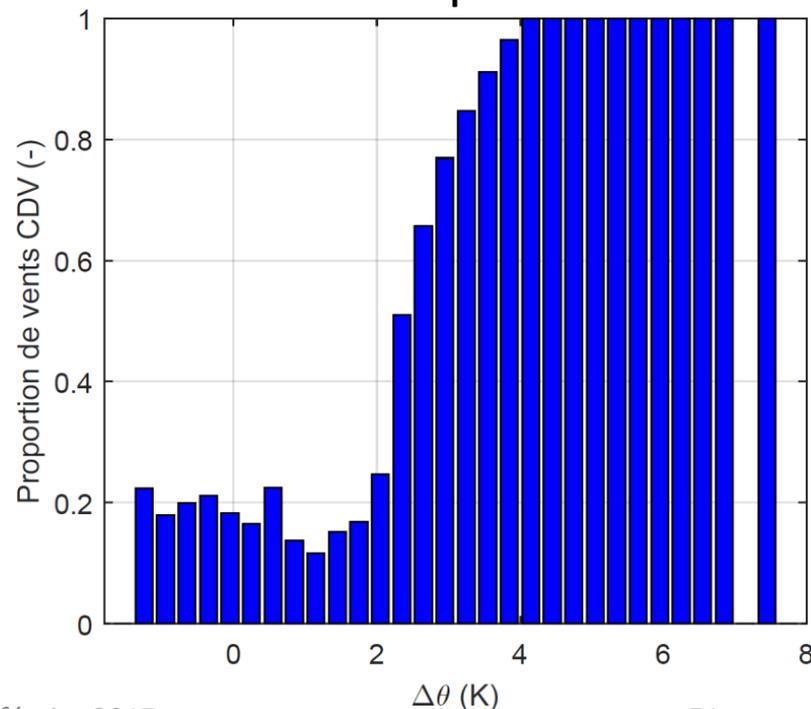
$$\Delta\theta_{(110m-2m)}, u_{10m}, v_{10m} \text{ et } U_{110m}$$

Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

Rôle relatif de chaque entrée dans le calcul du RNA

- u_{10m} et v_{10m} : fondamentales pour le calcul des sorties
- $\Delta\theta_{(110m-2m)}$: très important pour le calcul des vents thermiques descendant la vallée de Cadarache
- U_{110m} : rôle pas bien défini

Cas	Ru	Rv
RNA_{4var}	0,80	0,71
$RNA_{4var-dT}$	0,77	0,70
$RNA_{4var-V110}$	0,77	0,70
$RNA_{4var-u10}$	0,68	0,68
$RNA_{4var-v10}$	0,75	0,63

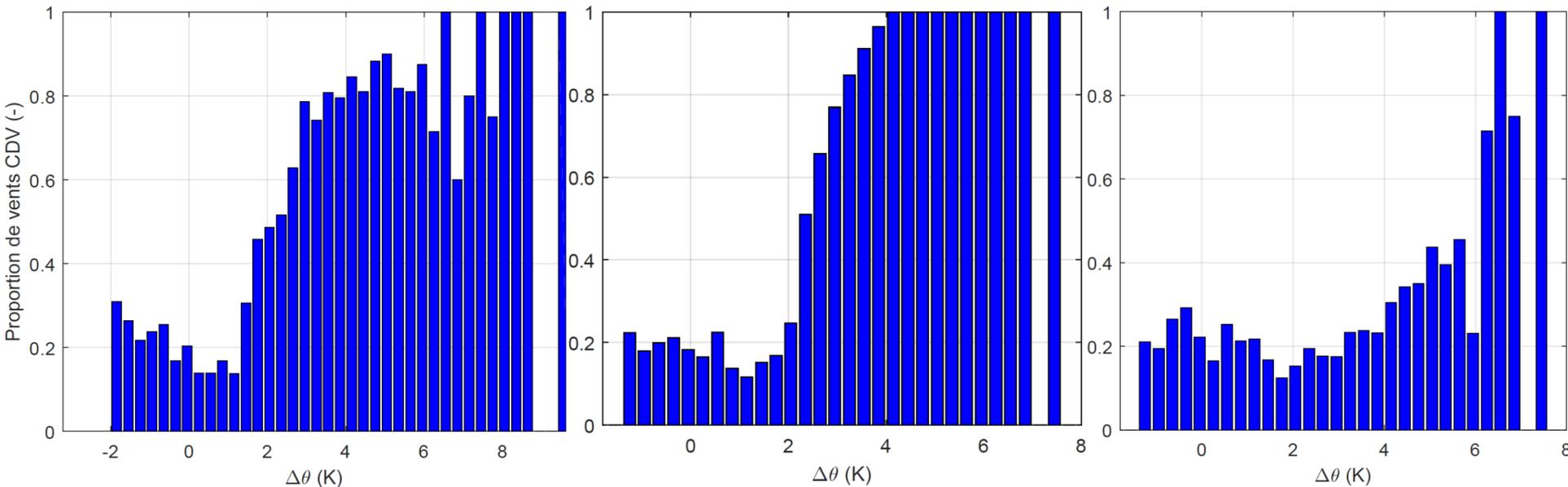


Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

Rôle relatif de chaque entrée dans le calcul du RNA

- $\Delta\theta_{(110m-2m)}$: très important pour le calcul des vents thermiques descendant la vallée de Cadarache

→ comparaison avec WRF et les observations



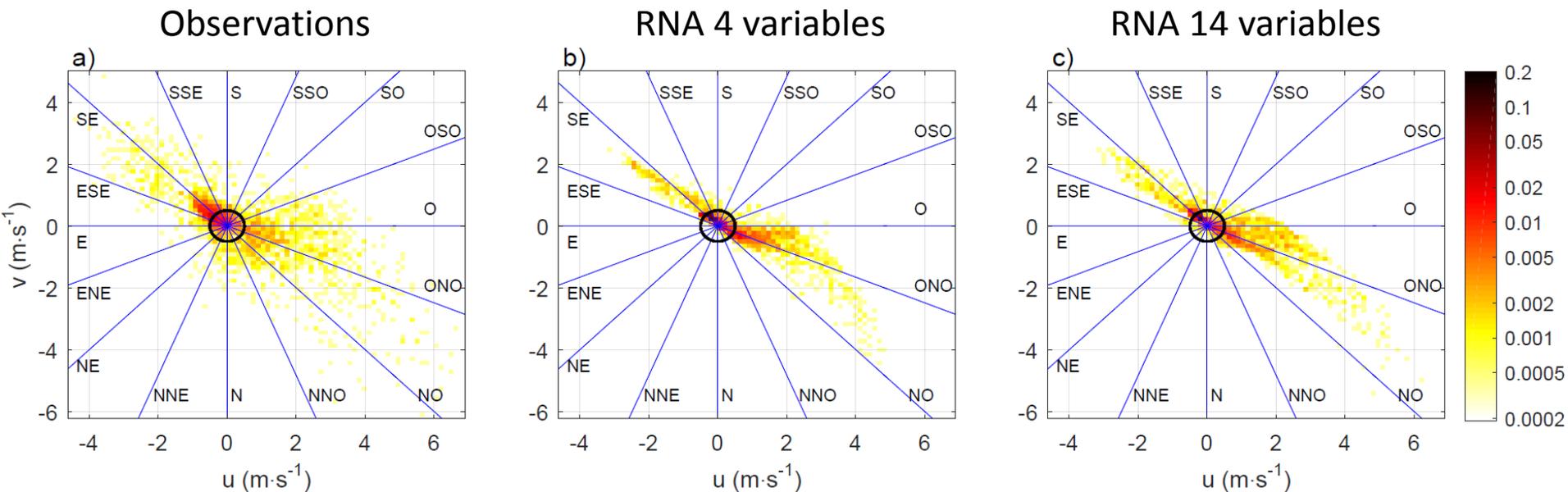
Directions et $\Delta\theta$ observés

Directions RNA et $\Delta\theta$ WRF
Journées Air et radioactivité - 2 février 2017

Directions et $\Delta\theta$ WRF

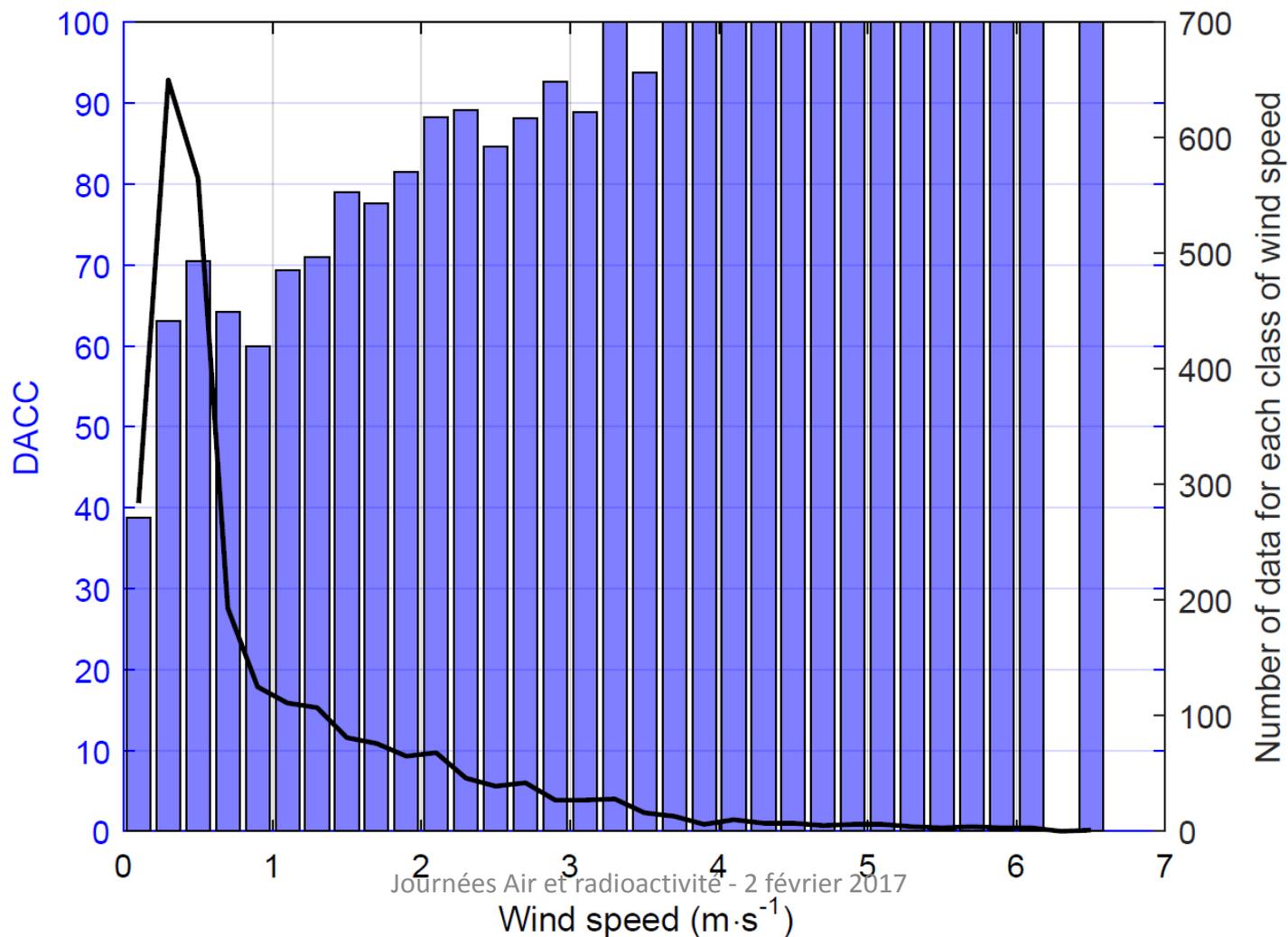
Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

La gamme de variation d'une composante par rapport à l'autre est bien plus importante dans les observations



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

Gain de performance avec l'augmentation du module du vent



Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

Performances des différents RNA et des prévisions WRF

Cas	EQM		DACC	PC		Corrélation			Module (m s^{-1})	
	train	test		2c	3c	Module	u	v	Biais	MAE
WRF _{110m}	-	-	0,64	0,74	0,63	0,70	0,78	0,64	+1,12	2,12
WRF _{10m}	-	-	0,55	0,65	0,50	0,72	0,70	0,59	+1,79	2,00
RNA _{KASCinc}	56,8	53,5	0,90	0,92	0,89	0,92	0,94	0,90	-0,19	0,48
RNA _{KASCcomp}	53,6	45,1	0,91	0,93	0,89	0,92	0,96	0,93	-0,20	0,50
RNA _{OBS}	77,9	77,2	0,74	0,83	0,69	0,89	0,92	0,83	-0,23	0,46
RNA _{OBS05}	77,9	77,2	0,86	0,91	0,81	0,89	0,93	0,86	-0,17	0,50
RNA _{complet}	74,2	79,3	0,77	0,83	0,73	0,74	0,80	0,71	-0,29	0,76
RNA _{4var}	79,0	79,0	0,75	0,82	0,73	0,74	0,80	0,71	-0,46	0,81

Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

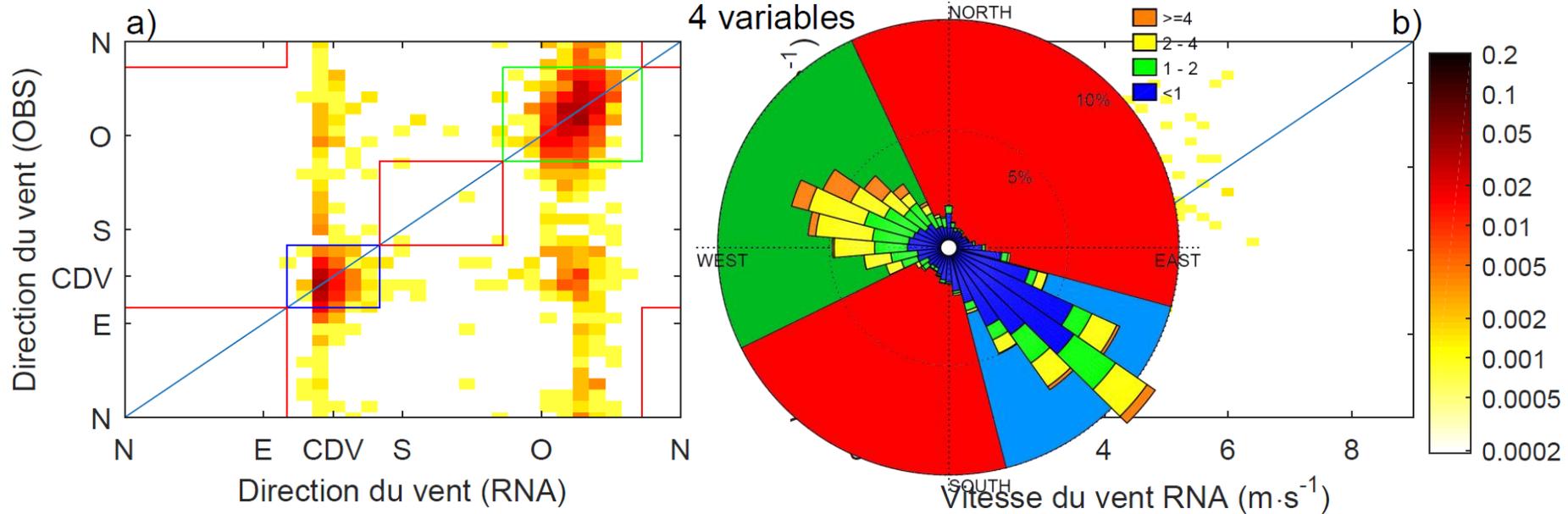
Calcul du vent à 2m par le RNA (sorties), par comparaison avec les observations de ce vent dans la vallée de Cadarache (cibles), à partir de plusieurs variables issues des simulations WRF (entrées).

$$\textit{sortie} = f(\textit{entrées})$$

L'objectif est de trouver f telle que les sorties se rapprochent le plus possible des observations

Réseau de Neurones Artificiels (WRF)

RNA avec 4 variables en entrée : $\Delta\theta_{(110m-2m)}$, U_{110m} , u_{10m} et v_{10m}

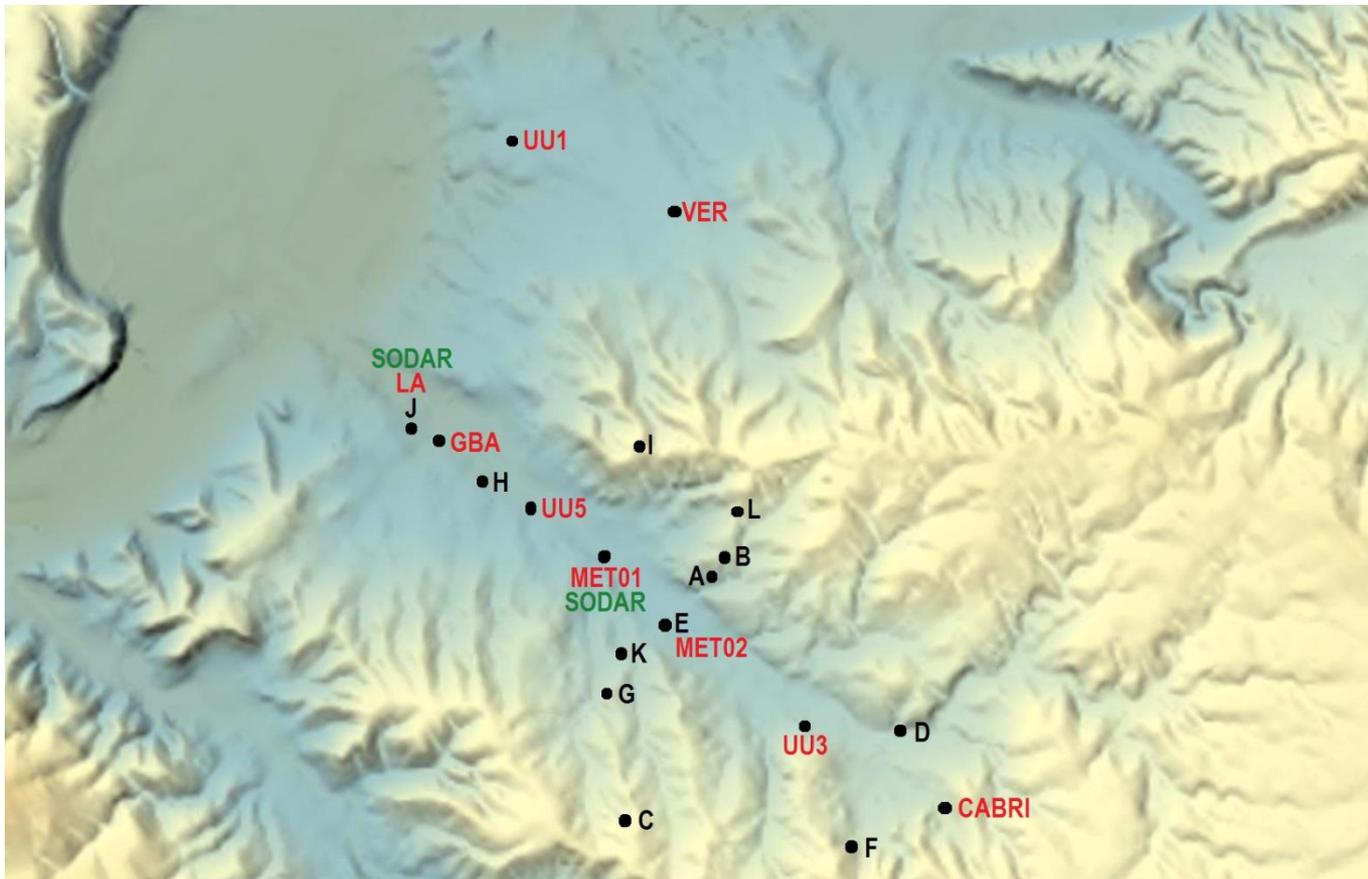


	DACC	PC2	PC3	Ru	Rv	R vit	Biais vit	MAE vit
WRF	0,55	0,65	0,50	0,70	0,59	0,72	+1,79 m/s	2,00 m/s
RNA ₁₄	0,77	0,83	0,73	0,80	0,71	0,74	-0,29 m/s	0,76 m/s
RNA ₄	0,75	0,82	0,73	0,80	0,71	0,74	-0,46 m/s	0,81 m/s

KASCADE 2017 (01/2017 – 06/2017)



Spatialisation des mesures dans la vallée de Cadarache pour observer la formation et l'évolution du vent de vallée de Cadarache avec



Motivation

Le LMTE doit évaluer le transport atmosphérique des rejets produits sur Cadarache pour l'étude de l'impact des installations de Cadarache.

- Orographie très marquée
 - Vallée de la Durance (~5km)
 - Vallée de Cadarache (~1km)
- Intérêt particulier pour les conditions stables (KASCADE, Duine 2015) qui sont fréquentes dans la région et qui sont les plus pénalisantes du point de vue de la dispersion des polluants



Moyens Expérimentaux



LABORATOIRE
D'AÉROLOGIE



1000 m

500 m

250 m

110 m

30 m

10 m

0 m

Sol

5 000 m
Altitude
p/r au sol

→ Point de mesure
↕ Zone de mesure



BC
Ballon captif
Prairie 219

M30 ou M10C
Prairie 219

M10
Mât LMTE
mobile



SOD ou MTK
SODAR mobile



PTUaH



RS
Radiosondages
prairie 219

CADARACHE

LMTE & Laboratoire d'Aérodynamique

4