



Étude du cycle diurne de la structure verticale des cumulus d'alizés et de sa sensibilité aux conditions environnementales

Master Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère et du Climat
Stage de M2 sous la direction de Jean-Louis Dufresne
et Jessica Vial

Julie CARLES
Mars - Juillet 2021

Table des matières

1	Introduction	2
2	Données et méthodes	3
2.1	Barbados Cloud Observatory	3
2.2	Réanalyses ERA5 et observations de la bouée NTAS	4
2.3	Les campagnes Narval et Eurec ^{4a}	4
3	Identification des populations de nuages bas	5
3.1	Caractérisation des populations	5
3.2	Calcul du cycle diurne	6
3.2.1	Masque nuageux	6
3.2.2	Calcul du cycle diurne moyen	9
3.2.3	Limites de la méthode	9
4	Premier aperçu de la variabilité du cycle diurne liée à l’environnement	11
5	Sensibilité du cycle diurne des nuages à leur environnement	13
5.1	Dépendance des paramètres diurnes à chacune des variables	13
5.1.1	Moyenne diurne de la fraction nuageuse	14
5.1.2	Amplitude du cycle diurne	16
5.1.3	Phase du cycle diurne	16
5.1.4	Résumé	17
5.2	Dépendance aux situations météorologiques	19
5.2.1	Covariations des variables environnementales	19
5.2.2	Influence couplée des conditions environnementales sur le cycle diurne	22
6	Discussions/perspectives	25
6.1	Interprétation physique	25
6.2	Conclusion	27
A	Appendice	31

1 Introduction

Les cumulus d'alizés sont des nuages de basse altitude présents au dessus des océans tropicaux. Cette catégorie de nuages est majoritaire dans cette région et leur influence sur le climat est importante, notamment via leur effet d'albédo. Cependant les mécanismes régissant leurs propriétés et la dépendance de celles-ci aux autres grandeurs atmosphériques ne sont encore que partiellement compris, et de multiples questions se posent à leur sujet depuis quelques années. Il a été démontré qu'ils jouent un rôle important dans les incertitudes des estimations de sensibilité climatique (Bony and Dufresne 2005), et ils expliquent une grande partie de la diversité de la réponse inter-modèles au changement climatique. Depuis quelques années, on s'intéresse spécifiquement à l'évolution de la fraction nuageuse à la base de ces nuages. En effet, la convection peu profonde qui donne naissance à ces nuages est simulée par les modèles de climat de différentes manières. Selon ces représentations, des profils verticaux de fraction nuageuse différents sont obtenus, et les évolutions simulées de ces profils avec le changement climatique présentent une grande disparité au niveau de la base des nuages (Stevens, Farrell, et al. 2016, Vial, Bony, et al. 2016).

Plusieurs axes de recherche actuels visent donc une meilleure compréhension de la variabilité spatiale et temporelle des cumulus d'alizés, des paramètres qui contrôlent cette variabilité, et de leur dépendance aux conditions environnementales dans lesquelles ils se forment et évoluent. Une meilleure compréhension permettrait de mieux interpréter la réponse des cumulus dans le contexte du réchauffement global.

Ainsi, Vial, Vogel, Bony, et al. 2019 se sont intéressés au cycle diurne de couverture nuageuse, qui a très peu été étudié jusqu'à aujourd'hui. Leur étude met en avant des variations diurnes de la fraction nuageuse à la base n'ayant jamais été évoquées auparavant. Ces variations ne s'observent qu'à l'échelle diurne et non à des échelles de temps plus longues; ce résultat est donc particulièrement intéressant lorsque l'on sait que les rétroactions liées aux nuages dépendent fortement de l'évolution de la fraction nuageuse au niveau de la base.

De plus, des travaux en cours mettent en évidence une forte corrélation inter-modèles entre la représentation du cycle diurne des nuages bas, et l'amplitude de l'évolution de la couverture nuageuse simulée en réponse au changement climatique. L'étude du cycle diurne offre donc l'opportunité de réduire la dispersion liée aux rétroactions nuageuses entre les modèles en contraignant indirectement par les observations la réponse simulée des nuages au réchauffement.

C'est dans ce contexte qu'une campagne de mesure de grande envergure, Eurec⁴a (*Evaluating the role of clouds-circulation coupling in climate*, Bony, Stevens, et al. 2017), a été menée entre janvier et février 2020 dans une zone d'alizés, au large de l'île de la Barbade dans l'océan Atlantique tropical. Un jeu de données d'une grande qualité a été récolté sur les cumulus d'alizés et leurs conditions environnementales, avec pour but de mieux comprendre les interactions entre les nuages et la circulation et de contraindre la sensibilité des nuages à l'environnement.

Le stage que j'ai effectué s'insère dans cet environnement de recherche et vise à répondre aux questions suivantes. Peut-on utiliser les observations à notre disposition afin de contrain-

dre les rétroactions nuageuses dans les modèles? Les cycles diurnes de couverture nuageuse correspondant aux campagnes Narval (la campagne de mesure étudiée dans Vial, Vogel, Bony, et al. 2019) et Eurec⁴a sont-ils représentatifs de ceux observés sur des plus grandes échelles de temps et d’espace? Les conditions environnementales grande échelle telles que le vent, la vitesse verticale, l’humidité ou la stabilité influencent-elles le cycle diurne? Et si oui, comment et pourquoi?

Pour aborder les réponses à ces interrogations, j’ai caractérisé le cycle diurne des cumulus d’alizés à partir des mesures d’un observatoire situé dans une zone représentative des régions d’alizés (Medeiros and Nuijens 2016), à l’est de l’île de la Barbade. J’ai ensuite étudié sa dépendance à certaines variables environnementales jugées importantes dans la dynamique des nuages. L’analyse que je réalise porte à la fois sur la couverture et la structure verticale des nuages.

Dans la section 2 sont décrites les données qui ont servi à cette analyse et les méthodes utilisées. La section 3 présente la classification des nuages bas que j’ai adoptée. La section 4 compare les résultats obtenus pour les périodes des campagnes Narval et Eurec⁴a à ceux de la climatologie, la section 5 présente l’analyse de la dépendance du cycle diurne à l’environnement. Enfin, dans la section 6, je présente une synthèse des résultats et introduit des perspectives à l’étude.

2 Données et méthodes

2.1 Barbados Cloud Observatory

La principale source de données météorologiques que j’ai utilisée au cours du stage est l’observatoire de nuages localisé sur l’île de la Barbade dans l’atlantique Nord (Barbados Cloud Observatory, BCO, Stevens, Farrell, et al. 2016). Cet observatoire, en fonctionnement depuis 2010, est situé sur la pointe est de l’île, en 13°N, 59°O. Il est géré conjointement par le Max Planck Institute for Meteorology de Hambourg (MPI) et le Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology in Barbados. Sa localisation sur une île située dans une zone d’alizés, non perturbée par la présence de continents, sous l’influence directe des alizés, en fait un endroit unique et stratégique, propice à l’observation des cumulus caractéristiques des océans tropicaux. Il a été montré que pour étudier les cumulus de basse altitude, cette région et les nuages s’y formant sont représentatifs des zones d’alizés (Medeiros and Nuijens 2016).

Sur le site sont présents différents instruments, notamment un radar de nuages. Ses données de réflectivité me fournissent la plupart des informations dont j’ai besoin pour la couverture et la structure verticale des nuages. De plus, j’utilise les données d’un capteur de vent proche de la surface, pour calculer des paramètres de déplacement et de taille de nuages. J’ai également étudié la précipitation mesurée par un micro rain radar (MRR). En suivant Vial, Vogel, Bony, et al. 2019, j’ai pris les données de précipitation à une altitude de 320 mètres, choisie comme l’altitude la plus basse à laquelle les mesures sont valides.

Je choisis de travailler sur les mois d’hiver de décembre, janvier, février, et mars, saison

au cours de laquelle l'étude des cumulus d'alizés est la plus pertinente. En effet, la zone de convergence intertropicale (ZCIT, ITCZ en anglais), qui se situe dans l'hémisphère sud au cours de l'hiver boréal, remonte en été au nord de l'équateur, non loin de la Barbade. L'ITCZ est associée à des épisodes de convection profonde, avec des nuages ayant une très grande extension verticale et des précipitations intenses. Ces événements sont bien plus fréquents en été qu'en hiver et ne relèvent pas du domaine de l'étude. Les nuages que j'étudie sont propres à un régime de subsidence modérée où la vitesse verticale à 700 hPa (ω_{700} , en hPa jour⁻¹), est positive (voir Bony, Dufresne, et al. 2004, Medeiros and Nuijens 2016, Brueck, Nuijens, and Stevens 2015 pour la classification de la circulation atmosphérique grande-échelle en régimes dynamiques, définis en fonction de la vitesse verticale dans la troposphère). La région autour de la Barbade présente ces caractéristiques en hiver, tandis qu'en été la zone présente une faible ascendance à 700 hPa. Ainsi, les hivers 2012 à 2020 sont étudiés.

2.2 Réanalyses ERA5 et observations de la bouée NTAS

Dans un second temps, j'ai utilisé les réanalyses ERA5 pour connaître les conditions environnementales grande-échelle. Je me suis intéressée aux variables connues pour avoir une influence sur la formation et la dynamique des cumulus (Brueck, Nuijens, and Stevens 2015, Bony, Schulz, et al. 2020): le vent de surface, la vitesse verticale moyennée entre 600 et 700 hPa ($\omega_{600-700hPa}$, en hPa jour⁻¹), l'humidité spécifique entre 400 et 600 hPa ($q_{400-600hPa}$), et enfin, à partir des températures potentielles à 700 et à 1000 hPa, la stabilité dans la basse troposphère (Lower Tropospheric Stability, $LTS = \theta_{700} - \theta_{1000}$, en Kelvin). Au départ, j'ai également pris en compte l'humidité relative, mais celle-ci étant très corrélée à l'humidité spécifique et n'apportant pas d'informations supplémentaires, je l'ai retirée de l'analyse. Les données ERA5 sont utilisées sur un pas de temps horaire, moyennées sur la journée. Les valeurs obtenues me servent de grandeurs qui caractérisent l'environnement dans lequel les nuages évoluent.

Enfin, j'ai utilisé des observations de vent et de température de surface océanique (Sea Surface Temperature, SST) provenant de la bouée NTAS (Northwest Tropical Atlantic Station) localisée en 14,82°N, 51,02°O dans l'atlantique tropical (à l'est de BCO), mises à disposition par la Woods Hole Oceanographic Institution. Elle me permettent de comparer le vent de surface à NTAS avec celui d'ERA5 et de BCO, et de considérer les conditions de température de surface de l'océan (valeur moyenne, cycle diurne, etc).

2.3 Les campagnes Narval et Eurec⁴a

En décembre 2013 a eu lieu une campagne d'observations, Narval (*Next-generation Aircraft Remote-sensing for VALidation studies*), ayant permis de recueillir des mesures sur les cumulus d'alizés en supplément de la station BCO. Des simulations haute résolution réalisées sur les dates de cette campagne ont servi de cadre pour l'étude du cycle diurne de Vial, Vogel, Bony, et al. 2019. Un des buts principaux de Narval a surtout été la préparation d'une

seconde campagne de plus grande envergure, Eurec⁴a (*Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate*, Bony, Stevens, et al. 2017), qui s'est déroulée du 20 janvier au 20 février 2020 à la Barbade et à l'est de la Barbade. Elle a impliqué des chercheurs en provenance de multiples laboratoires internationaux et a permis de recueillir un précieux jeu de données sur les cumulus d'alizés et leur environnement. Je cherche lors du stage à caractériser la manière dont les conditions météorologiques rencontrées au cours de ces deux campagnes, longues d'une dizaine de jours pour Narval et un mois pour Eurec⁴a, se situent par rapport à la climatologie.

3 Identification des populations de nuages bas

3.1 Caractérisation des populations

Afin de mieux comprendre et interpréter la dynamique des différents types de nuages, leur comportement à l'échelle diurne, j'ai réalisé une décomposition des nuages en plusieurs catégories en fonction de l'altitude de leur base et de leur sommet, en suivant la classification faite par Vial, Vogel, Bony, et al. 2019. Dans une première partie du stage, j'ai commencé par distinguer trois populations de nuages, que j'ai résumées dans la figure 1. Une première population est constituée de nuages très bas et à faible extension verticale, surnommés les "very shallow", caractérisée par une base (cloud base, CB) en dessous de 1 km et un sommet (cloud top, CT) qui ne dépasse pas 1.3 km, en orange sur la figure 1. La seconde catégorie, les "deeper", concerne les nuages dont la base est située en dessous de 1 km et le sommet entre 1.3 et 4 km. Ces nuages sont plus profonds et plus précipitants que les "very shallow" et sont représentés en vert. La troisième catégorie, "stratiform", en rouge, comprend les nuages dont la base dépasse 1.3 km et dont le sommet reste en dessous de 4 km. Ils peuvent être le résultat du détachement d'une portion d'un "deeper" qui reste confinée sous l'inversion des alizés.

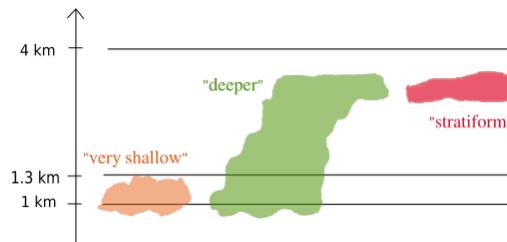


Figure 1: Schéma résumant les trois catégories initiales de nuages.

Initialement, la distinction est faite entre les nuages plus profonds et les stratiformes, car le cycle diurne mis en évidence dans Vial, Vogel, Bony, et al. 2019 semble être influencé de manière non négligeable par cette dernière population. Cependant, les analyses que j'ai effectuées montrent que les nuages stratiformes présentent une très faible fraction nuageuse et n'influencent pas, ou très peu, le cycle diurne de la couverture totale. Cela suggère que les "stratiform" sont généralement rattachés à des nuages "deeper" dont la base est en dessous d'1

km. J'ai donc réuni les types "deeper" et "stratiform", et résume les nuages à deux populations séparées par le critère de hauteur du sommet à 1.3 km, schématisées dans la figure 2. Cela permet de garder les informations essentielles à l'analyse et de faciliter en même temps la lecture des graphes.



Figure 2: Schéma résumant les deux catégories de nuages finales, utilisées dans la suite.

3.2 Calcul du cycle diurne

3.2.1 Masque nuageux

Pour le calcul du cycle diurne, je m'inspire de la méthode utilisée dans Vial, Vogel, Bony, et al. 2019. Cependant ma méthode diffère légèrement de cette dernière, en ce qu'elle comprend l'utilisation d'un masque nuageux, développé par Heike Konow du MPI (voir figure 3). La méthode pour construire le masque analyse les données de réflectivité, auxquelles elle applique un seuil à -50 dBZ pour la détection de nuages, et de vent en provenance de BCO, puis produit un masque qui sépare les nuages en entités individuelles. Ce masque me permet d'étudier les nuages un par un et d'associer à chacun une hauteur de base (définie comme l'altitude du point le plus bas du nuage), de sommet (le point le plus haut), une longueur (grâce aux mesures de vent), une heure de passage, etc. Vial, Vogel, Bony, et al. 2019, dans leur méthode, ont pris en compte la base et le sommet de la couche nuageuse en estimant que l'objet observé occupe l'intégralité de la couche entre la base et le sommet. Aucune distinction n'est faite entre un nuage profond et 2 nuages superposés avec de l'air vide de nuages entre les deux. Avec le masque nuageux, il devient possible de distinguer deux nuages situés l'un au dessus de l'autre et donc de les classer dans les catégories qui leur correspondent.

Des évènements de convection profonde peuvent avoir lieu dans la région, même au cours de l'hiver boréal. Ces épisodes ne rentrent pas dans l'étude des cumulus d'alizés, et influencent grandement le cycle diurne car ils correspondent à une couverture nuageuse élevée et à grande extension verticale. Je cherche donc à les retirer des données. Pour cela, je définis un épisode de convection profonde par la présence d'un nuage ou d'une partie de nuage au delà de 4 km. Lorsque cela se produit sur au moins un pas de temps d'une durée de 10 secondes, je retire des données le nuage entier et pas uniquement sa fraction qui dépasse 4 km. D'un autre côté, je ne considère pas comme convection profonde les nuages dont la base dépasse 8 km, ceux-ci

étant des nuages hauts (ex: cirrus) qui sont considérés comme peu ou pas influents sur le cycle diurne des cumulus peu profonds.

Comparaison des méthodes sans et avec masque nuageux, le 12 Février 2020 (Eurec⁴a)

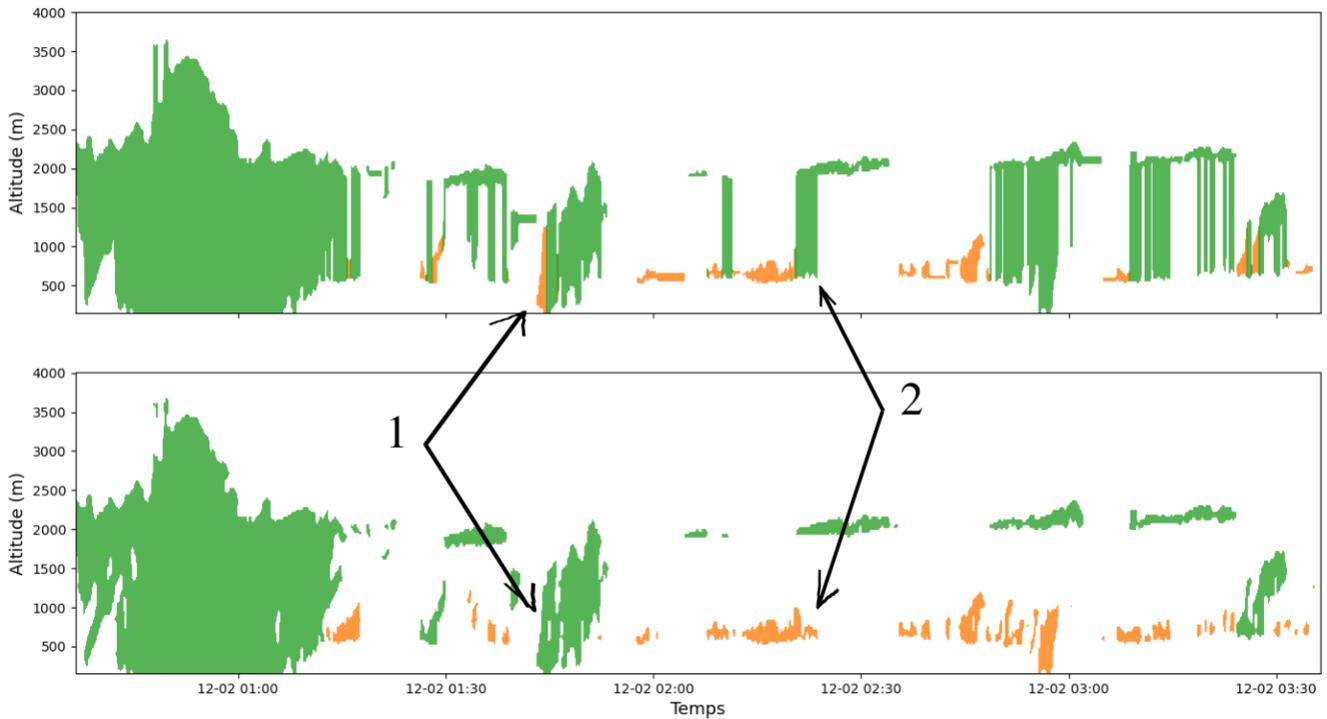


Figure 3: Comparaison des méthodes sans (au dessus) et avec masque nuageux (au dessous), pour le 12 février 2020. Les nuages identifiés par chacune des méthodes comme très peu profonds ("very shallow") sont en orange et les plus profonds ("deeper") en vert. La double flèche 1 indique un exemple de sous-estimation de la couverture des nuages profonds ("deeper"), associée à une sur-estimation de la couverture des très peu profonds ("very shallow") par la méthode de Vial, Vogel, Bony, et al. 2019, et la flèche 2 un exemple de sous-estimation de la couverture nuageuse des "very shallow".

Une première comparaison entre les deux méthodes est visible sur la figure 3, et les cycles diurnes qui en résultent présentent des légères différences, plus ou moins importantes selon la décomposition de nuages que l'on effectue. On peut les observer dans la figure 4, où sont tracés les cycles diurnes moyens sur la période Eurec⁴a pour les deux méthodes et les deux

classification adoptées. Dans le graphe de gauche j'utilise la décomposition en 3 populations, "very shallow", "deeper" et "stratiform", et dans celui de droite je réunis les deux dernières catégories "deeper" et "stratiform" (voir section 3.1).

Les principales différences entre les deux méthodes se manifestent au niveau des couvertures nuageuses associées aux populations de nuages profonds et stratiformes (figure 4, graphe de gauche). Ces différences sont atténuées dans le graphe de droite mais restent . Les écarts entre les courbes s'expliquent par plusieurs raisons.

D'une part, la méthode sans le masque sous-estime la couverture nuageuse liée aux nuages profonds (courbes vertes dans la figure 4). Avec cette méthode, le sommet et la base sont regardés à chaque pas de temps, donc un nuage qui a un sommet au delà de 1300 m et une base en dessous de 1000 m (un "deeper") sera classé comme très peu profond à tous les pas de temps où son sommet ne dépasse pas les 1300 m (voir flèche 1 dans la figure 3) et classé comme nuage stratiforme aux pas de temps où sa base dépasse 1 km. Avec la méthode utilisant le masque, il suffit qu'un nuage dépasse les 1300 mètres à un unique pas de temps pour être classé pendant toute sa durée dans les plus profonds. Il est donc normal que la courbe vert clair se situe en dessous de la vert foncé.

Cette sous estimation de la couverture nuageuse liée aux nuages plus profonds va de pair avec une sur-estimation des "very shallow" et des "stratiform". On le remarque bien sur les cycles des stratiformes, en rouge dans la figure 4. En revanche les courbes oranges liées aux très peu profonds présentent très peu de différences. Ceci est dû à la méthode sans masque qui sous-estime également la couverture nuageuse due aux nuages très peu profonds: quand 2 nuages sont superposés, l'un au dessus de 1300 m et l'autre en dessous, la méthode sans masque compte un seul nuage profond et l'autre méthode en compte 2, un pour chacune des deux populations (flèche 2 dans la figure 3). Ce dernier point a également pour conséquence le fait que la courbe 'total' dans la méthode avec le masque soit inférieure à la somme des courbes verte et jaune, car deux nuages superposés contribuent chacun à la couverture nuageuse associée à leur catégorie, mais ils contribuent comme un seul nuage à la couverture nuageuse totale.

Ainsi, les différences entre les deux méthodes sont marquées lorsque l'on sépare les cumulus d'alizés en 3 catégories, mais sont réduites si on associe les parties stratiformes aux nuages plus profonds (l'addition des courbes rouges et vertes du graphe de gauche de la figure 4 donne les courbes vertes du graphe de droite). Les cycles diurnes obtenus sont alors très similaires.

La méthode n'utilisant pas le masque permettrait donc d'observer séparément des parties de nuages stratiformes situées sous l'inversion des alizés mais rattachées à des nuages plus profonds (les "deeper"). En utilisant le masque, ces nuages sont confondus avec les "deeper". La question de la pertinence d'associer ou non ces parties stratiformes aux "deeper" se pose naturellement, leur dynamique se rapprochant de celle des "stratiform" n'étant pas (ou plus) rattachés à des "deeper". Cette question reste à étudier plus en détail et, comme précisé dans la partie 3.1, dans la suite de ce rapport je ne fais pas la distinction entre les "deeper" et les "stratiform".

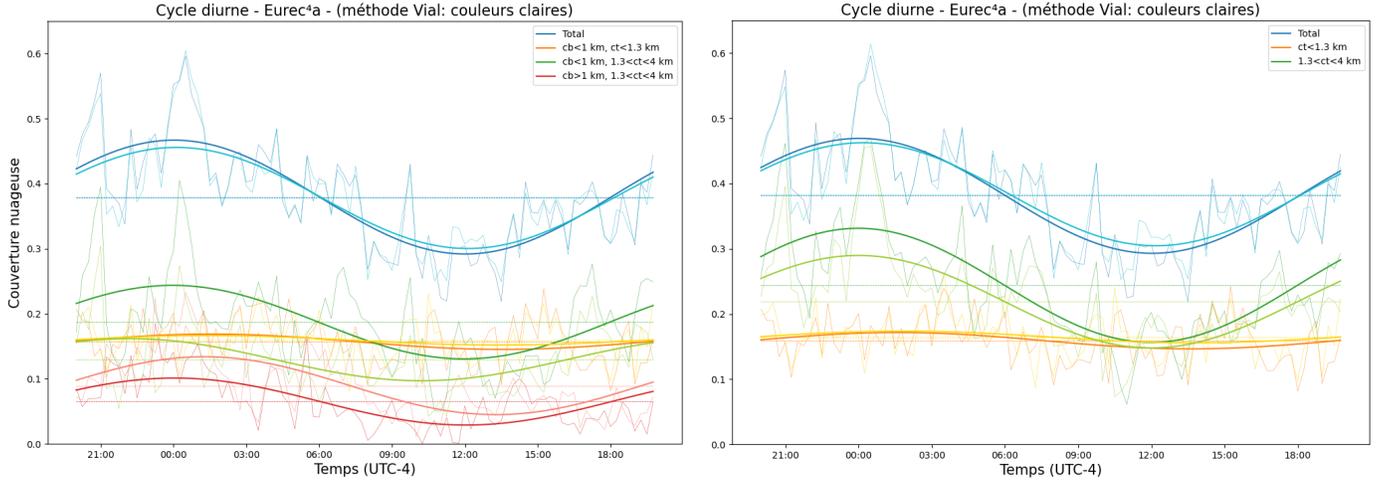


Figure 4: Cycle diurne moyen pour la période Eurec⁴a, à gauche pour la classification en 3 populations de nuages ("very shallow" en orange, "deeper" en vert et "stratiform" en rouge) et à droite pour la classification en 2 populations où les "stratiform" sont inclus dans les "deeper". Les couleurs les plus foncées correspondent à la méthode utilisant le masque, et les plus claires la méthode sans le masque nuageux. Le cycle diurne de la couverture totale est en bleu.

3.2.2 Calcul du cycle diurne moyen

Le cycle diurne est très variable, en amplitude (différence de fraction nuageuse entre le maximum et le minimum de la journée), en fraction moyenne et en phase (heure du maximum de couverture nuageuse). Les courbes obtenues, moyennées sur quelques jours ou sur plusieurs années, sont très bruitées et il est parfois compliqué de lire sur les figures une couverture nuageuse moyenne, un maximum et un minimum de couverture nuageuse. Pour définir le cycle, nous avons choisi d'utiliser la première harmonique de Fourier du cycle diurne, qui correspond à une période de 24 heures (voir figure 4). Ceci conduit à l'impossibilité de traiter certains jours, l'harmonique ne pouvant être calculée quand il y a des trous dans les données, ce qui arrive fréquemment dans les observations des radars. Le cycle diurne moyen obtenu pour la climatologie est finalement calculé à partir de plus de 550 jours d'observations.

3.2.3 Limites de la méthode

La manière dont le cycle moyen est calculé et représenté dans la figure 4 peut être trompeuse. En effet, les courbes obtenues correspondent à une moyenne du cycle diurne de couverture nuageuse sur tous les jours d'Eurec⁴a. L'amplitude et la phase observées sur les courbes sont l'amplitude et la phase de la moyenne, et non les valeurs moyennes de la phase et de l'amplitude calculées pour chacune des journées. Ces deux paramètres ont une très grande variabilité d'un

jour à l'autre (voir figure 5). Une conséquence de la définition que nous avons utilisée est que si deux jours ont des cycles déphasés de 12 heures et de même amplitude, alors le cycle moyen obtenu sera nul. On pourra donc interpréter un cycle moyen de faible amplitude de plusieurs manières: 1) les amplitudes sont élevées mais les phases très variables et éparpillées le long de la journée, ce qui conduit à un aplatissement de la courbe moyenne, 2) les amplitudes sont réellement faibles. C'est la première situation qui se rencontre le plus fréquemment, comme on peut le voir sur la figure 5 qui montre tous les cycles diurnes pour un décile de vent de surface et le cycle moyen associé. Il faut garder cela en tête lorsque l'on regarde des cycles moyens. Une façon d'éviter le "couplage" entre ces deux paramètres est de les observer séparément: prendre la moyenne des phases d'un côté et la moyenne des amplitudes d'un autre côté, c'est ce qui est fait dans la partie 5.

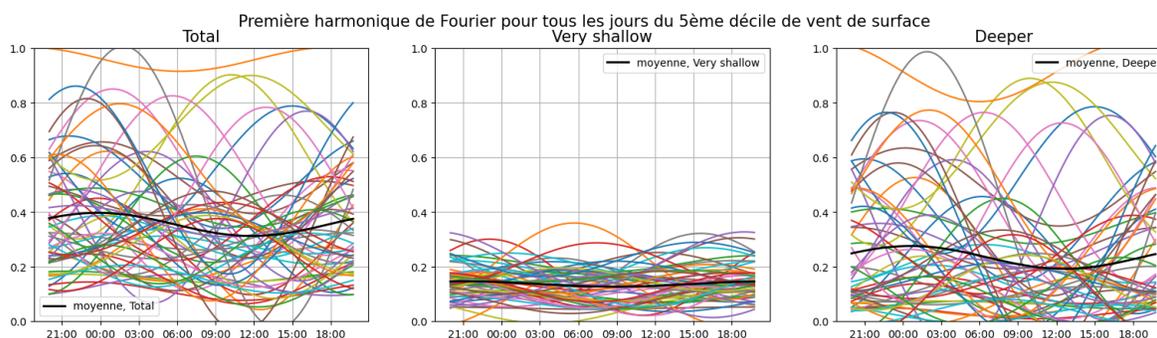


Figure 5: Cycles diurnes de la couverture nuageuse tracés pour tous les jours d'un décile de vent de surface (une cinquantaine de jours), pour la couverture nuageuse totale et les populations de nuages très peu profonds ("very shallow") et plus profonds ("deeper"). La moyenne des cycles est tracée en noir.

Une autre remarque à apporter est la question de la robustesse des cycles diurnes obtenus à partir de la première harmonique de Fourier des cycles "bruts" (moyennés en bins de 15 minutes). En effet, les harmoniques calculées jour à jour peuvent parfois ne pas bien représenter le cycle diurne du jour observé. Il se peut que certains jours ne présentent pas de cycle, ou encore présentent un cycle semi-diurne, qui pourrait être dû aux marées atmosphériques solaires, d'une période de 12 heures et qui sont la cause de variations semi-diurnes de pression atmosphérique (Christophersen, Foltz, and Perez 2020, Woolnough, Slingo, and Hoskins 2004). Dans ce cas, il faudrait également ajouter la seconde harmonique de Fourier, la première ne suffisant pas à décrire le cycle de couverture nuageuse. Cette hypothèse n'a pas été approfondie pendant le stage et par la suite j'utilise uniquement la première harmonique de Fourier pour décrire le cycle diurne de la couverture nuageuse.

4 Premier aperçu de la variabilité du cycle diurne liée à l'environnement

Dans cette partie je présente les cycles diurnes moyens pour les campagnes d'observations Narval et Eurec⁴a, ainsi que les conditions environnementales moyennes correspondant. Pour les situer dans un cadre plus large, je présente également les moyennes climatologiques. Les trois cycles obtenus, tracés dans la figure 6, présentent des caractéristiques assez similaires. Le maximum de couverture nuageuse est atteint au cours de la nuit, entre minuit et 3 heures, et le cycle diurne de la couverture totale est piloté par celui des nuages les plus profonds, les "deeper", avec lequel il est en phase. Les nuages très bas, eux, piquent quelques heures avant les plus profonds dans la climatologie et pour Narval, mais pas pour Eurec⁴a, où leur maximum est légèrement après celui des plus profonds. Une différence marquante entre les trois cycles diurnes des fractions nuageuses est l'amplitude, qui est beaucoup plus forte au cours de Narval que pour les deux autres. La climatologie présente une amplitude d'environ 0.1, Eurec⁴a 0.2 quand celle de Narval est de 0.4. La faible amplitude de la climatologie est due à la variabilité des phases qui, quand on moyenne sur plusieurs jours, "aplatit" l'amplitude du cycle. Celle de Narval est élevée car les cycles jour à jour sont remarquablement en phase.

Une question émerge alors: peut-on expliquer les différences de cycle diurne entre ces périodes par les conditions environnementales? On observe que Narval présente des conditions bien différentes de la climatologie et d'Eurec⁴a (bas de la figure 6). Le vent et la subsidence y étaient particulièrement intenses et stables (peu de variations) tout au long de la période (Vial, Vogel, Bony, et al. 2019), la troposphère bien plus sèche et plus stable (LTS) que la moyenne. Sur la période Narval, le cycle diurne de la fraction nuageuse a une plus grande amplitude, et la valeur moyenne de cette fraction est également plus élevée. La couverture nuageuse est à son maximum vers 03h. Les cycles diurnes de la climatologie et d'Eurec⁴a se ressemblent en termes de fractions nuageuse, sont légèrement déphasés, et leurs conditions environnementales sont relativement proches.

Cycles diurnes de couverture nuageuse, variables environnementales moyennées et erreurs standard

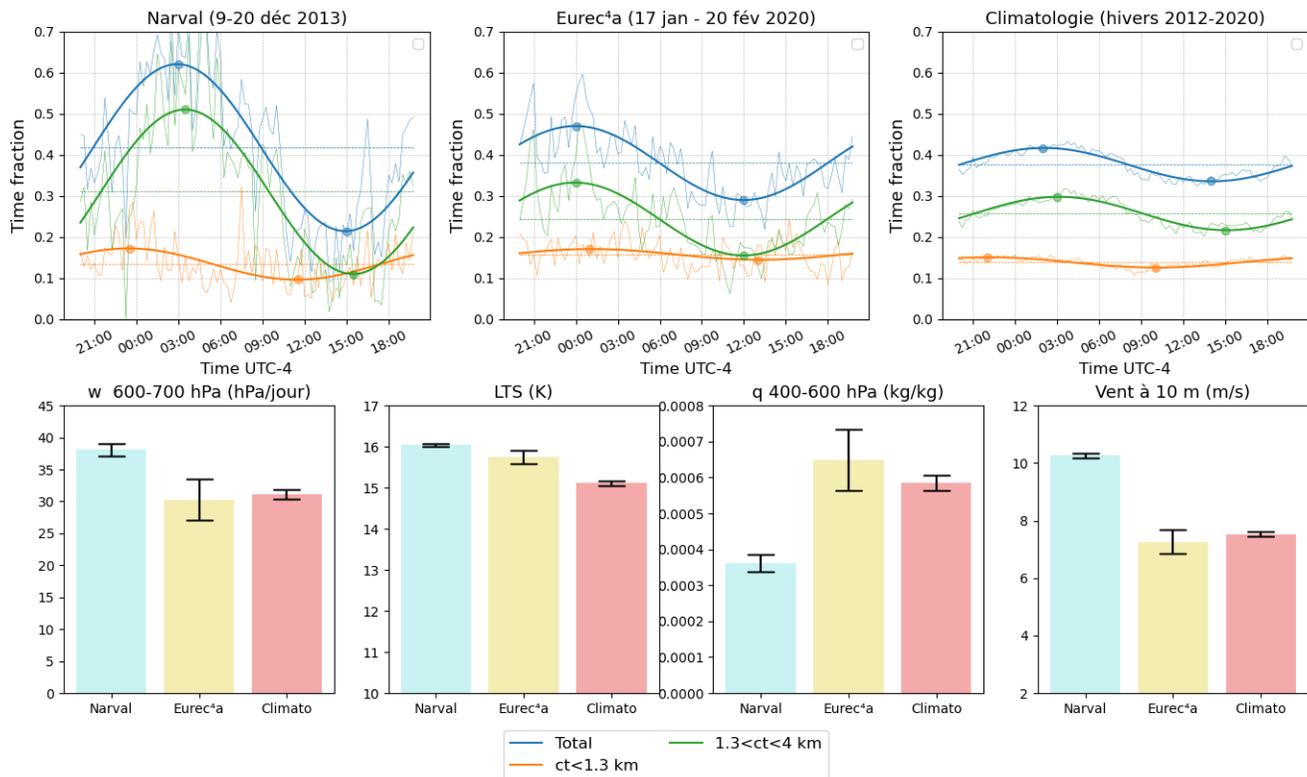


Figure 6: Comparaison des cycles diurnes de la couverture nuageuse (en haut) et des conditions environnementales moyennées (en bas), et de leurs écarts-types, au cours des périodes Narval, Eurec⁴a et pour la climatologie. La couverture totale est en bleu, les nuages très peu profonds ("very shallow") en orange et les plus profonds ("deeper") en vert. Les minima et maxima de couverture nuageuse sont représentés par les points sur les courbes.

On observe également des différences entre les trois périodes au niveau du profil vertical de la fraction nuageuse. La figure 7 montre ces profils pour différents intervalles autour des heures de minimum (courbe bleue) et de maximum (courbe rouge) de couverture nuageuse, à partir des courbes observées sur la figure 6. La période Narval, comme on l'a vu dans la figure précédente, affiche une grande variation de fraction nuageuse au cours de la journée, bien plus forte que les deux autres périodes. Pour les trois cycles le pic de fraction nuageuse se situe au niveau de la base des nuages, vers 800 mètres d'altitude. Au cours de la nuit un maximum local de fraction nuageuse se forme à une altitude plus élevée, autour de 2 km, qu'on peut attribuer aux nuages plus profonds (les "deeper").

Distribution verticale de couverture nuageuse pour les hivers 2012 à 2020, Narval et Eurec⁴a

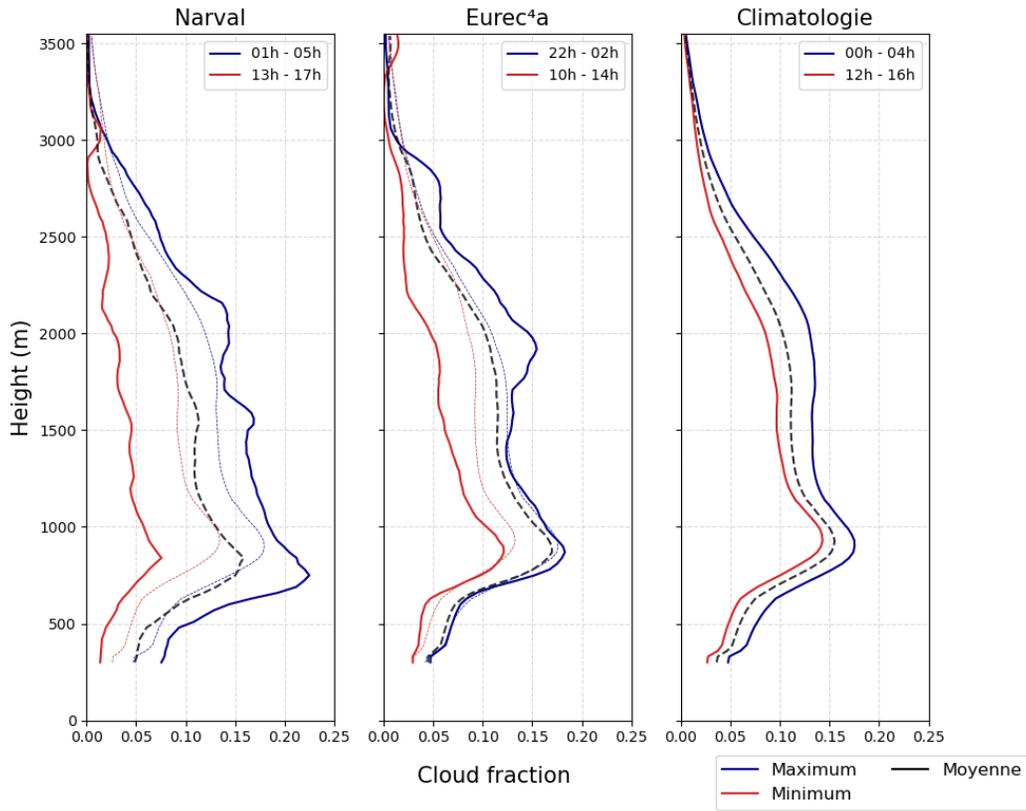


Figure 7: Profils verticaux de la couverture nuageuse au cours de Narval, Eurec⁴a et pour la climatologie. Les courbes en trait continu sont les profils moyennés aux heures de maximum (courbe bleue) et de minimum (courbe rouge) de couverture nuageuse correspondant à chaque période (cercles sur les cycles de la couverture totale dans la figure 6). Les courbes fines et pointillées bleues et rouges sont les moyennes climatologiques (colonne de droite), affichées sur les trois graphes à titre de comparaison. La courbe pointillée noire est la moyenne quotidienne pour chacune des périodes.

5 Sensibilité du cycle diurne des nuages à leur environnement

5.1 Dépendance des paramètres diurnes à chacune des variables

Cette partie a pour but de décrire la manière dont le cycle diurne varie en fonction des conditions environnementales. Comme grandeurs nuageuses, je considère la couverture totale et celle des deux catégories de nuages: les "very shallow" et les "deeper". J'analyse leur moyenne quo-

tidienne, l'amplitude et la phase de leur cycle diurne. Pour faire le lien avec l'environnement, j'ai calculé les déciles de la moyenne quotidienne de chacune des grandeurs atmosphériques caractérisant l'environnement des nuages, puis j'ai analysé comment le paramètre diurne variait selon les déciles. Ainsi, j'étudie l'amplitude et la phase séparément, ce qui apporte un point de vue différent de celui des parties précédentes. Les figures 8, 9 et 10 montrent les dépendances des paramètres nuageux aux conditions météorologiques, que je quantifie par des régressions linéaires (en pointillés) avec R^2 le coefficient de détermination et s le coefficient directeur de la droite (dans le tableau 1).

5.1.1 Moyenne diurne de la fraction nuageuse

Toutes les variables environnementales ont une influence sur la moyenne diurne de la fraction nuageuse (figure 8). Ces dépendances sont associées aux nuages plus profonds. Le vent est la seule variable qui est significativement corrélée avec la fraction nuageuse des "very shallow", les autres n'ayant pas, ou que très peu d'effet (très faible R^2). La fraction est la plus influencée par la stabilité (LTS), qui présente le coefficient de détermination ($R^2 = 0.91$) et la pente ($s = 0.97$) les plus élevés. L'intensité de la subsidence, elle, est la variable ayant le moins d'influence sur la fraction totale ($R^2 = 0.43$). Il est intéressant de noter que les valeurs des campagnes Narval et Eurec⁴a, représentées par les points noirs et rouges, se situent sur les pentes. Il semble donc que les différences de fraction moyenne entre ces deux périodes peuvent être assez bien expliquées par les différences de l'environnement.

La stabilité (LTS), le vent et la subsidence sont corrélés positivement avec la fraction nuageuse, tandis que la corrélation avec l'humidité est négative. On peut tenter d'apporter une explication physique à ces relations. La relation entre le vent et la fraction nuageuse est bien connue et décrite (Nuijens and Stevens 2012, Mieslinger et al. 2019): le vent de surface, en se renforçant, a pour conséquence une intensification des flux de surface et donc un approfondissement des nuages et une augmentation de la fraction nuageuse. Une troposphère plus humide que la moyenne produit un apport supplémentaire de vapeur d'eau qui provoque une diminution du refroidissement radiatif au sommet des nuages, ce dernier étant favorisé par une atmosphère sèche. Le refroidissement radiatif étant un moteur important de la formation de ces nuages bas, sa diminution a pour effet de réduire la fraction nuageuse. Une stabilité plus élevée renforce l'inversion, ce qui a pour effet de piéger l'humidité dans la couche limite et permet à la couverture nuageuse de s'étendre (Wood and Bretherton 2006, Mieslinger et al. 2019). Enfin, l'effet de la vitesse verticale sur la couverture nuageuse est plus compliqué à expliquer seul, mais peut être lié à celui d'autres variables via des corrélations entre celles-ci. Par exemple, lorsqu'elle s'intensifie, la subsidence peut rendre la couche plus stable, l'humidité se retrouve capturée et la fraction nuageuse augmente par l'effet de l'humidité et de la LTS. Je me penche sur ces covariations entre les grandeurs atmosphériques dans la section 5.2.

Fractions nuageuse selon les déciles des conditions environnementales

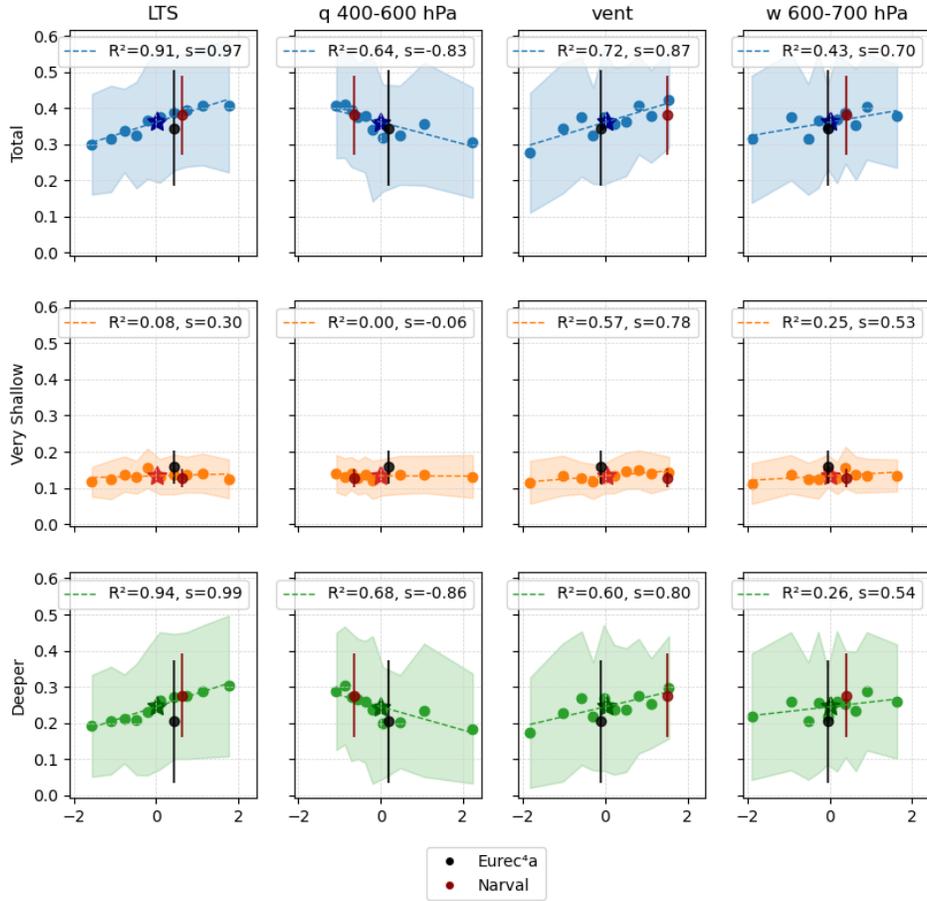


Figure 8: Variations de la moyenne diurne et de celle des différentes populations de nuages en fonction des conditions environnementales. Sur l'axe des abscisses, les déciles de LTS, humidité, vent et subsidence ont été normalisés par l'écart-type (je soustrais au point du décile la moyenne de tous les points puis divise par l'écart-type). Le code couleur est le même que précédemment: couverture totale en bleu, nuages peu profonds en orange et ceux plus profonds en vert. Les étoiles correspondent aux moyennes sur toute la période climatologique (hivers 2012 à 2020), les points rouges et noirs aux moyennes sur les périodes Narval et Eurec⁴a, respectivement. L'écart type pour chaque décile est représenté par la zone colorée autour des points (et les barres verticales autour des points Narval et Eurec⁴a).

5.1.2 Amplitude du cycle diurne

L'amplitude du cycle diurne, contrairement à la fraction nuageuse, n'est pas influencée par toutes les variables environnementales (figure 9, tableau 1). Seule la LTS et l'humidité ont un effet notable sur cette grandeur. Encore une fois, ce sont les nuages les plus profonds qui pilotent les variations d'amplitude de la couverture totale, et les dépendances jouent sur cette catégorie de nuages. Les corrélations vont dans le même sens que pour la fraction nuageuse: l'amplitude du cycle diurne augmente avec la stabilité, tandis qu'elle diminue quand l'humidité augmente. Pour les nuages très peu profonds, les points des campagnes sont bien placés sur les droites de régression. En revanche, pour la couverture totale et celle des nuages profonds, le point Narval est plus éloigné des droites. Il reste cependant placé dans le sens de la pente et dans l'intervalle des écarts-types (en observant uniquement la LTS et l'humidité qui sont les deux variables présentant une corrélation avec l'amplitude): Narval a une amplitude très élevée pour une LTS forte et une humidité faible. Pour l'intensité du vent et de la subsidence, on observe également un fort écart entre la période Narval et la climatologie, sans que l'on puisse interpréter ce décalage, au vu de l'absence de corrélation entre l'amplitude du cycle diurne et ces deux variables. Aussi, les écarts entre les points des campagnes ne s'expliquent pas aussi bien par l'environnement que les moyennes diurnes.

5.1.3 Phase du cycle diurne

La phase du cycle diurne est la grandeur qui est la moins influencée par les conditions grande-échelle (figure 10, tableau 1). La LTS et l'humidité, qui sont les deux paramètres qui jouent le plus sur l'amplitude, n'ont aucun effet significatif sur la phase. C'est le vent et la subsidence qui expliquent le mieux les variations de phase du cycle diurne, mais les corrélations sont tout de même plus faibles que celles avec la fraction nuageuse et l'amplitude du cycle diurne. La subsidence est légèrement corrélée à la phase des "deeper" ($R^2 = 0.34$, $s = 0.62$), et le vent à celle des "very shallow" ($R^2 = 0.32$, $s = 0.58$). Ces populations de nuages ont tendance à piquer plus tardivement dans la nuit quand le vent ou la vitesse verticale entre 600 et 700 hPa augmentent. Une forte intensité de la subsidence et du vent est aussi associée à un étalement des phases en plus d'un décalage vers le tard (voir figure 13 dans la section suivante). Cette relation est plus compliquée à expliquer, une recherche bibliographique et une analyse plus poussée sont nécessaires avant d'avancer des hypothèses.

De plus, les points des campagnes d'observations sont ici plus éloignés du nuage de points et des droites de régression. Particulièrement, Narval présente une phase beaucoup plus tôt, aux alentours de 02h00 du matin. On ne peut donc pas justifier les déphasages entre Narval et Eurec⁴a par les conditions environnementales. Les résultats de cette partie peuvent différer de ceux de la partie 4 à cause de la manière d'étudier la phase du cycle diurne: calculer la moyenne des phases ou prendre la phase de la moyenne.

Amplitude du cycle diurne selon les déciles des conditions environnementales

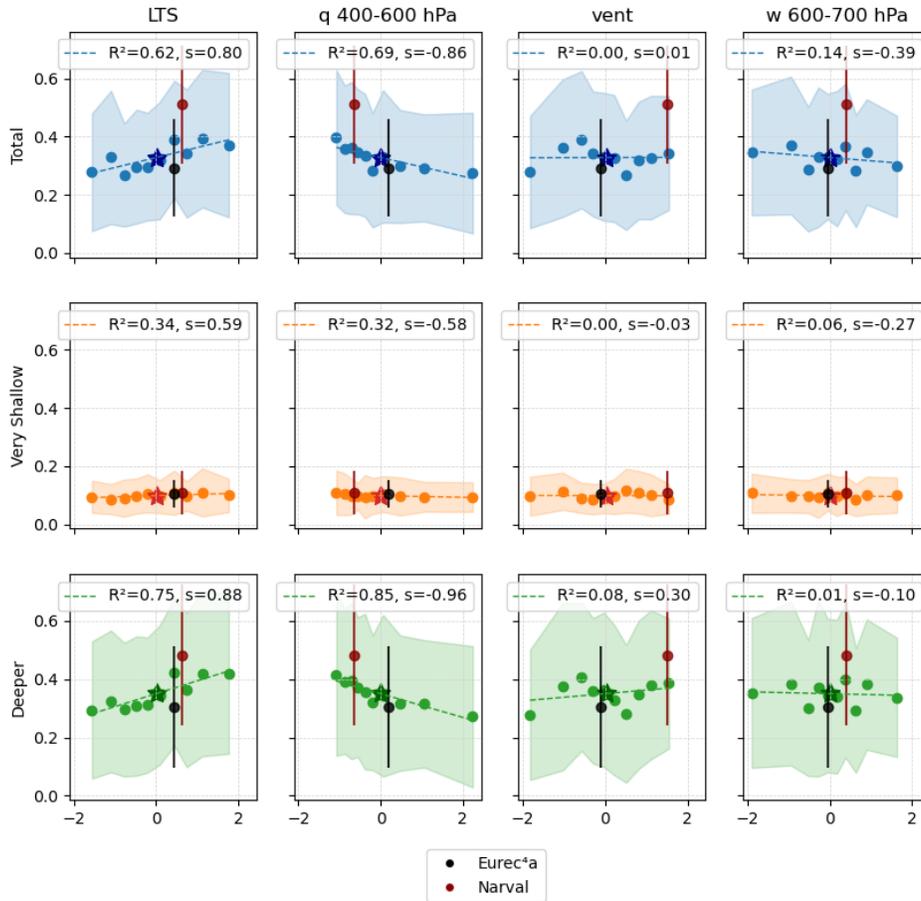


Figure 9: Même figure que la 8, pour l'amplitude du cycle diurne.

5.1.4 Résumé

On retient de cette partie 5.1 plusieurs éléments, que l'on peut lire dans la table 1 qui résume les figures 8, 9, et 10. Elle recense les coefficients de détermination et les pentes des droites de régression pour la fraction moyenne, l'amplitude et la phase du cycle diurne de couverture nuageuse, pour chaque variable et chaque population de nuages. Les corrélations les plus fortes (on choisit un seuil à $R^2 > 0.4$) sont affichées en couleur orange. On retient premièrement que toutes les conditions environnementales auxquelles je me suis intéressée - la stabilité, l'humidité, le vent et la subsidence - font varier la fraction nuageuse, via la population de nuages profonds ("deeper") qui se développent au cours de la nuit. Curieusement, le vent a

également une influence sur la fraction des nuages très peu profonds, ce qui est un résultat nouveau par rapport à la littérature existante. L'amplitude du cycle est impactée par la LTS et l'humidité à travers les nuages profonds ("deeper"). Enfin, la phase du cycle diurne semble beaucoup moins influencée par l'environnement. L'intensité du vent et de la subsidence tendent à décaler et étaler la phase des "very shallow" et des "deeper" vers des heures plus tardives, respectivement.

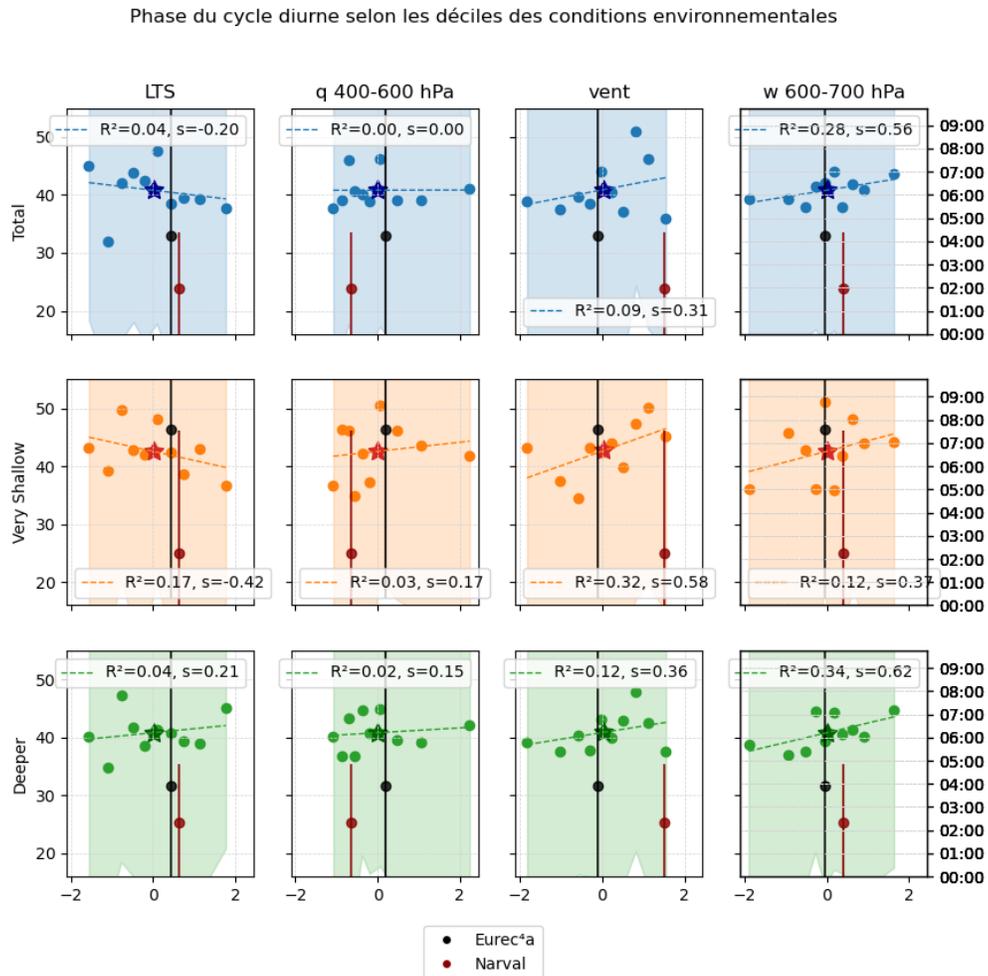


Figure 10: Même figure que la 8, pour la phase du cycle diurne.

		LTS	Humidité	Vent	Subsidence
Fraction	Total	$R^2 = 0.91$ $s = 0.97$	$R^2 = 0.64$ $s = -0.83$	$R^2 = 0.72$ $s = 0.87$	$R^2 = 0.43$ $s = 0.70$
	Very Shallow	$R^2 = 0.08$ $s = 0.30$	$R^2 = 0.00$ $s = -0.06$	$R^2 = 0.57$ $s = 0.78$	$R^2 = 0.25$ $s = 0.53$
	Deep	$R^2 = 0.94$ $s = 0.99$	$R^2 = 0.68$ $s = -0.86$	$R^2 = 0.60$ $s = 0.80$	$R^2 = 0.26$ $s = 0.54$
Amplitude	Total	$R^2 = 0.62$ $s = 0.80$	$R^2 = 0.69$ $s = -0.86$	$R^2 = 0.00$ $s = 0.01$	$R^2 = 0.14$ $s = -0.39$
	Very Shallow	$R^2 = 0.34$ $s = 0.59$	$R^2 = 0.32$ $s = -0.58$	$R^2 = 0.00$ $s = -0.03$	$R^2 = 0.06$ $s = -0.27$
	Deep	$R^2 = 0.75$ $s = 0.88$	$R^2 = 0.85$ $s = -0.96$	$R^2 = 0.08$ $s = 0.30$	$R^2 = 0.01$ $s = -0.10$
Phase	Total	$R^2 = 0.04$ $s = -0.20$	$R^2 = 0.00$ $s = 0.00$	$R^2 = 0.09$ $s = 0.31$	$R^2 = 0.28$ $s = 0.56$
	Very Shallow	$R^2 = 0.17$ $s = -0.42$	$R^2 = 0.03$ $s = 0.17$	$R^2 = 0.32$ $s = 0.58$	$R^2 = 0.12$ $s = 0.37$
	Deep	$R^2 = 0.04$ $s = 0.21$	$R^2 = 0.02$ $s = 0.15$	$R^2 = 0.12$ $s = 0.36$	$R^2 = 0.34$ $s = 0.62$

Table 1: Coefficients de détermination (R^2) et pentes (s) correspondant aux corrélations entre les conditions environnementales et la fraction nuageuse, l'amplitude ainsi que la phase du cycle diurne, pour trois catégories de nuages. Les variables sont normalisées par l'écart type, ainsi que les pentes des droites de corrélation. Les cases en orange sont celles où le R^2 est supérieur à 0.4, qu'on a choisi comme valeur seuil de significativité des corrélations pour cette analyse. Celles en rose sont celles où la corrélation et la pente sont les plus fortes entre la phase et une variable donnée.

5.2 Dépendance aux situations météorologiques

5.2.1 Covariations des variables environnementales

Après avoir étudié les dépendances du cycle diurne aux conditions environnementales une à une, je me pose la question de l'existence d'éventuelles covariations entre ces grandeurs. De la même façon que dans la partie précédente, je sépare les moyennes quotidiennes des grandeurs environnementales en déciles, puis pour chaque décile de chaque variable je calcule la moyenne des autres variables. La division en déciles me permet de réduire la quantité de points tout en gardant les informations essentielles à l'analyse. Le résultat est affiché dans la figure 11, toutes les anomalies sont normalisées par l'écart-type afin d'avoir tous les graphes à la même échelle et de pouvoir se rendre compte des grandeurs qui varient le plus. Je fais une nouvelle fois des régressions linéaires pour me rendre compte des corrélations, avec le R^2 et la pente (s)

affichés pour chaque paire de variable. Les couples où la corrélation est la plus forte (ici on choisit $R^2 > 0.7$) sont en orange. On en note trois: 1) la stabilité et l'humidité, 2) l'humidité et la subsidence, et 3) le vent et la subsidence. Les deux paires qui comprennent l'humidité montrent une corrélation négative, et le vent et la subsidence sont corrélés positivement.

Ici aussi on peut tenter d'expliquer les corrélations. 1) La LTS est liée à l'humidité par un mécanisme mentionné plus tôt: lorsqu'elle est élevée, la stabilité agit comme un "couvercle" sur l'humidité dans la couche de mélange, qui ne peut pas être transportée hors de la couche limite par la convection. La troposphère libre entre 400 et 600 hPa est donc plus sèche que quand la stabilité est moins forte. 2) La subsidence apporte de l'air sec en provenance de la haute troposphère vers les pressions de la basse troposphère. Ainsi, une subsidence renforcée a pour effet d'assécher la couche d'atmosphère entre 400 et 600 hPa. Pour la dernière corrélation, le vent et la subsidence peuvent se voir de manière simplifiée comme une boucle dans la circulation grande échelle. Le vent de surface (les alizés) est couplé à la vitesse verticale (ici la subsidence, branche descendante des circulations de Hadley et Walker) et si l'un s'intensifie, l'autre fait de même, ce qui explique la relation 3).

Une fois ces couples de variables corrélées entre elles identifiés, je cherche à savoir s'il est possible de dégager des caractéristiques du cycle diurne résultant de situations combinant 2 variables.

Je choisis de me pencher d'abord sur la LTS et l'humidité. Ces deux grandeurs sont celles qui influencent le plus la fraction nuageuse moyenne et l'amplitude du cycle diurne (voir table 1). Dans un second temps, j'analyserai le couple subsidence - vent de surface, qui joue à priori un rôle sur la phase du cycle diurne. Le couple humidité - intensité de la subsidence est laissé de côté pour le moment, étant donné que ces deux variables n'ont pas l'air d'avoir un effet commun sur la couverture nuageuse dans la table 1.

Variations des conditions environnementales en fonction des déciles (normalisés par écarts types)

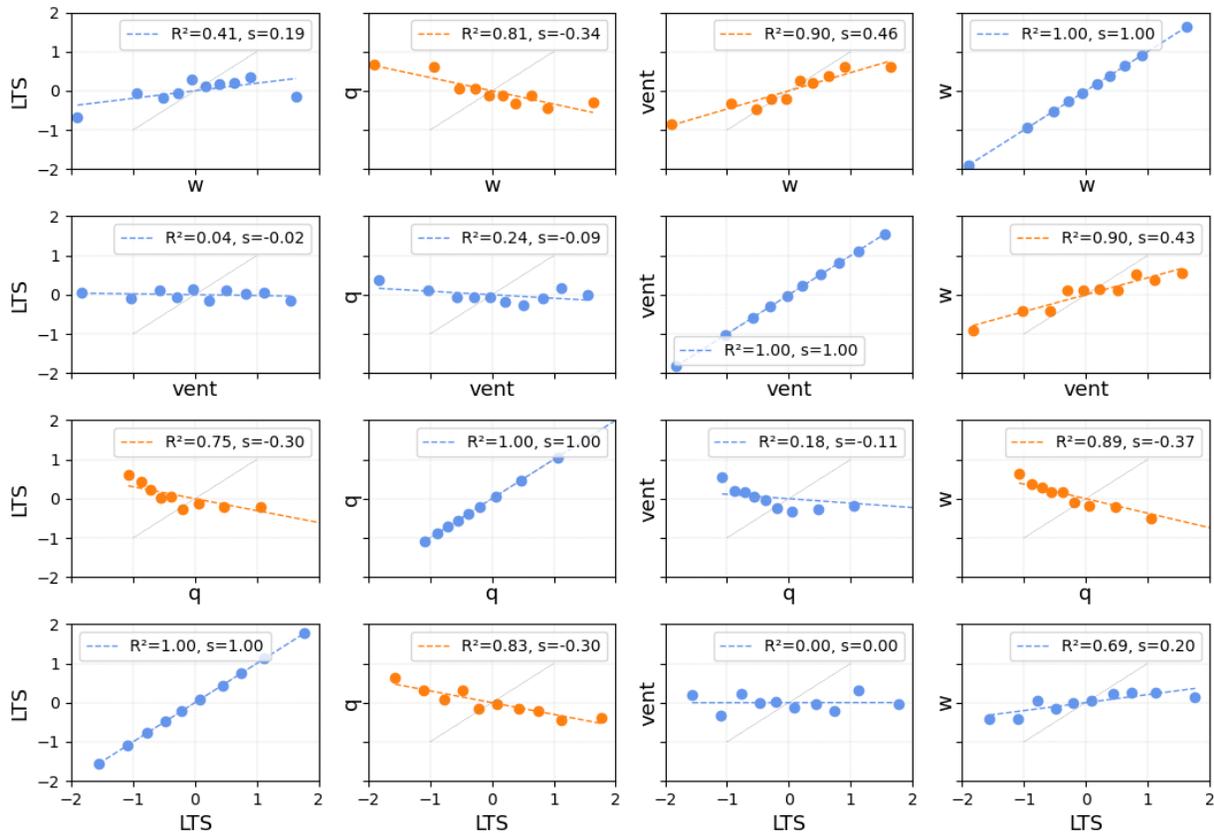


Figure 11: Graphes des covariations entre variables environnementales. L'abscisse correspond aux valeurs de chacun des déciles de la variable nommée en dessous de l'axe, auxquelles j'ai soustrait la moyenne puis divisé l'anomalie obtenue par l'écart-type des 10 déciles (normalisation par l'écart-type). L'axe des ordonnées correspond aux valeurs moyennes que prennent les variables nommées à gauche des axes dans chacun des déciles de la variable en abscisses, à nouveau normalisées par l'écart-type. Le coefficient de détermination R^2 et le coefficient directeur s de la régression linéaire (tracée en pointillés) sont affichés pour chaque couple. Les couples de variables qui ont un R^2 supérieur à 0.7 sont montrés en orange. Ce sont les trois couples retenus pour l'analyse.

5.2.2 Influence couplée des conditions environnementales sur le cycle diurne

Les figures 12 et 13 affichent des cycles diurnes construits à partir de jours correspondant à des intersections de terciles de conditions environnementales. Du fait de leur anticorrélation, je sélectionne les jours appartenant à la fois au premier tercile des moyennes quotidiennes de stabilité (LTS faible) et au dernier tercile d'humidité (humidité élevée), et trace le cycle diurne obtenu dans la colonne de gauche de la figure 12. La colonne de gauche de la figure 13 correspond à l'intersection entre les premiers terciles de vent et de subsidence (vent et subsidence faibles), la corrélation entre ces deux variables étant cette fois positive. Dans ces deux figures, la colonne de droite correspond à l'intersection des deux terciles opposés à ceux utilisés dans la colonne de gauche. Sur les trois premières lignes des figures sont tracés les contours de la densité de probabilité des heures du maximum de couverture nuageuse (la phase du cycle diurne, en abscisses), en fonction de l'amplitude du cycle (en ordonnées), pour tous les jours compris dans les deux intersections de terciles considérés. Sur la dernière ligne, je trace le cycle diurne moyen par population de nuages. Ainsi les cycles obtenus correspondent à des situations "types" auxquelles je m'intéresse: pour la figure 12 une LTS faible associée à une troposphère humide à gauche, la situation contraire à droite, et pour la figure 13 des situations de vent et subsidence faibles (à gauche) ou intenses (à droite).

On observe un cycle diurne avec de fortes amplitudes pour les situations stables avec une troposphère sèche (colonne de droite de la figure 12). La couverture des nuages très peu profonds pique après 21h00, suivie par les plus profonds aux alentours de 02h00. Le cycle diurne moyen obtenu montre une fraction nuageuse maximale un peu après minuit. Cette situation est proche de celle observée pour la campagne Narval. La fraction nuageuse moyenne est plus élevée pour cette situation que pour une troposphère peu stable et plus humide. Dans ce dernier cas, l'amplitude du cycle est bien plus faible et toutes les populations de nuages piquent à la même heure, juste avant minuit. Les densités de probabilités permettent de se rendre compte de la distribution des amplitudes et des phases du cycle. On voit dans la colonne de droite que l'heure des fractions maximales sont distribuées majoritairement entre minuit et 03h00, tandis qu'elles sont plus étalées dans la nuit dans la colonne de gauche. Les amplitudes ont le comportement opposé: elles sont plus variables et élevées dans la colonne de droite que celle de gauche où elles sont plus faibles. Aussi, je peux déduire que la faible amplitude du cycle moyen est à la fois dûe à des phases dispersées et également à des amplitudes réellement faibles.

Ce résultat de forte amplitude diurne (et moyenne journalière élevée) pour une troposphère stable et sèche concorde avec la table 1 qui indique une corrélation positive entre l'amplitude (la fraction) et la LTS, et négative avec l'humidité.

Pdf 2D des heures du maximum de couverture nuageuse et amplitude, et cycles diurnes des intersections des terciles de LTS et q

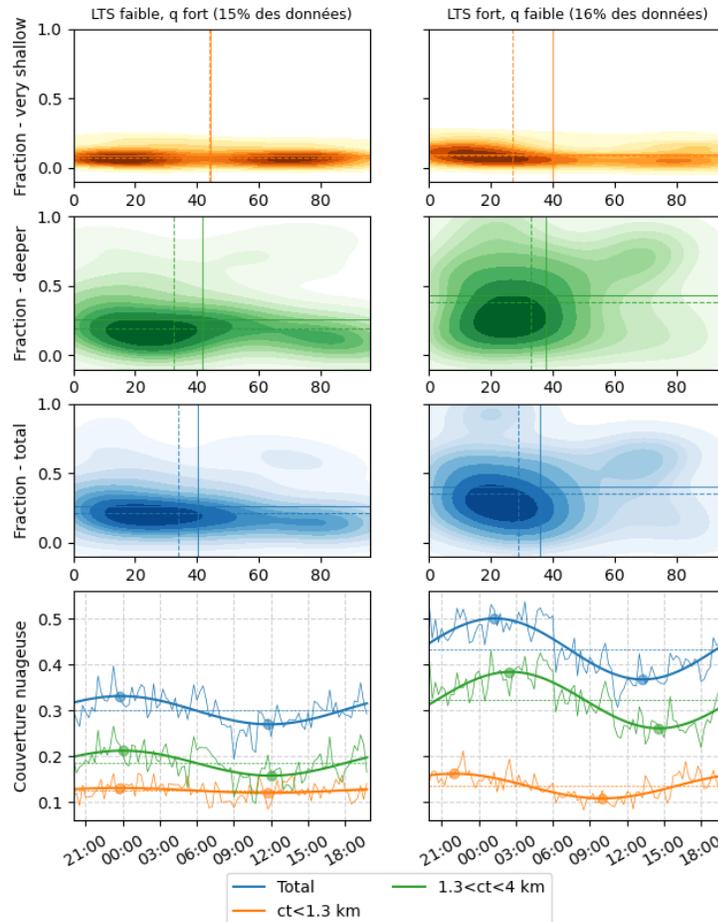


Figure 12: Sur les trois premières lignes, la densité de probabilité de la phase (en abscisses) en fonction de l’amplitude (en ordonnées) du cycle diurne, par population de nuages, puis, sur la dernière ligne, le cycle diurne associé. La colonne de gauche correspond au premier tercile de LTS et dernier tercile d’humidité de la troposphère libre, donc une situation avec faible stabilité et troposphère humide. La colonne de droite correspond aux tercile opposés: LTS forte et troposphère sèche. La moyenne et la médiane de la densité de probabilité de chaque paramètre sont représentées par les droites solides et pointillées, respectivement. L’axe des abscisses est le même pour tous les graphes et correspond aux heures de la journée.

La seconde paire étudiée, le vent et la subsidence, conduit à un cycle avec une phase retardée quand les variables sont dans leur dernier tercile (vent et subsidence forts), par rapport au

premier (vent et subsidence faibles). Cet effet est bien celui attendu, et on le constate aussi dans les densités de probabilités, avec une heure de maximum de fraction plus étalée dans le temps et décalée vers la nuit. De la même manière, la fraction nuageuse augmente avec les deux variables.

Pdf 2D des heures du maximum de couverture nuageuse et amplitude, et cycles diurnes des intersections des terciles de vent et w

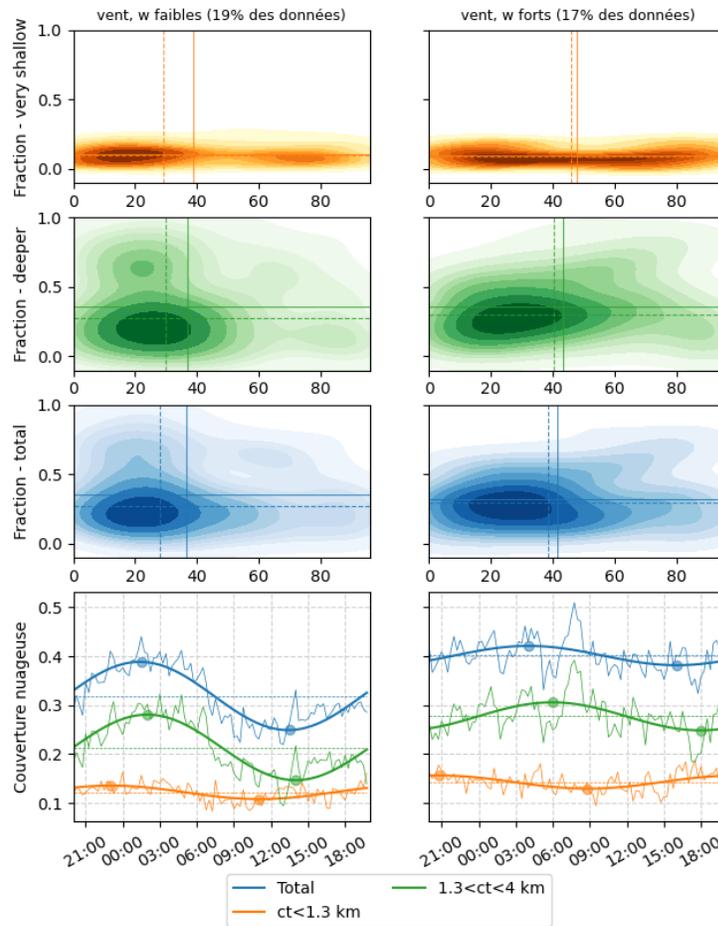


Figure 13: Même figure que la figure 12, pour le vent et la subsidence. La colonne de gauche correspond au premier quartile de vent et de subsidence, donc une situation subsidence et vent faibles. La seconde colonne correspond aux terciles opposés et à la situation inverse: vent fort et subsidence forte.

6 Discussions/perspectives

6.1 Interprétation physique

Il est possible d'apporter une explication un peu plus poussée et des hypothèses supplémentaires à la corrélation entre l'amplitude du cycle diurne, l'humidité et la stabilité de la basse troposphère. Stevens, Bony, et al. 2020 ont introduit une nouvelle façon de classifier les cumulus d'alizés selon leur organisation spatiale à méso-échelle. Les auteurs ont identifié subjectivement 4 patterns nuageux nommés Flower, Fish, Sugar et Gravel, affichés sur la figure 14, qui se distinguent par leurs propriétés à méso-échelle, mais qui révèlent également des différences au niveau de leurs structures verticales et des propriétés des environnements dans lesquels ils se forment et évoluent (Bony, Schulz, et al. 2020, Vial, Vogel, and Schulz 2021, Schulz, Eastman, and Stevens 2021). Certains patterns sont favorisés par des grandeurs environnementales spécifiques, comme la stabilité de la basse troposphère et l'intensité du vent de surface, qui influencent fortement leurs fréquences d'occurrences.

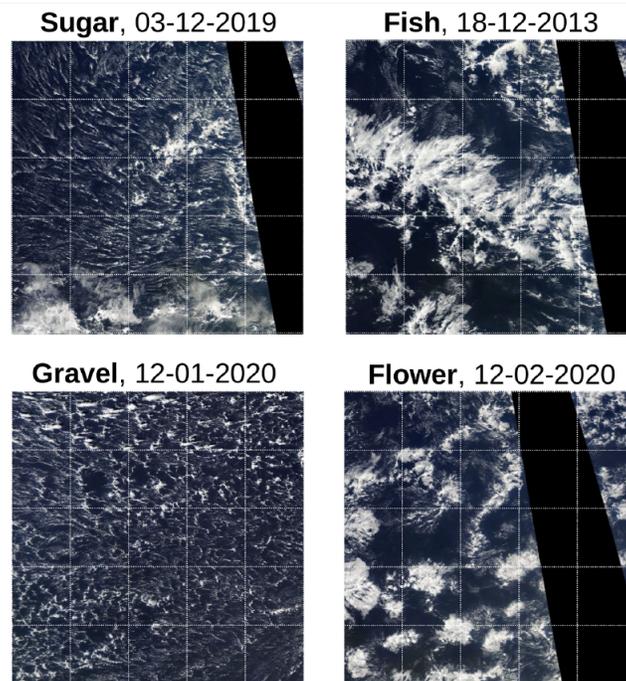


Figure 14: Images satellites illustrant les 4 patterns nuageux identifiés par Stevens, Bony, et al. 2020. Figure de Vial, Vogel, and Schulz 2021

Vial, Vogel, and Schulz 2021 ont analysé en détail le cycle diurne de ces différents patterns, et Stevens, Bony, et al. 2020 ont montré que les patterns "Flower" et "Fish" sont associés à des structures spatiales très nettes, avec des délimitations très marquées entre zones de ciel

clair et zones de ciel nuageux. De plus, leurs occurrences sont favorisées par une troposphère stable (Schulz, Eastman, and Stevens 2021).

La nuit, en l'absence de rayonnement solaire, le refroidissement radiatif au sommet des nuages devient le moteur de la convection peu profonde. Entre les zones de ciel clair et ciel nuageux pourrait alors se mettre en place une circulation à méso-échelle, avec des vitesses verticales ascendantes au coeur des nuages et subsidentes en ciel clair, une convergence de l'air en dessous de la couche nuageuse et une divergence en son sommet. Cette circulation serait induite par un gradient horizontal de rayonnement entre le sommet de la couche nuageuse et la zone de ciel clair (Naumann, Stevens, and Hohenegger 2019, Gray and Jacobson 1977, et figures 16 et 17). Ce delta de refroidissement radiatif provoquerait une subsidence compensatoire en zone de ciel clair et donc des ascendances dans le nuage. La figure 15 résume la situation de manière schématique et les profils de rayonnement et de vitesse verticale en figures 16 et 17 (en appendice) apportent plus de précisions sur cette circulation.

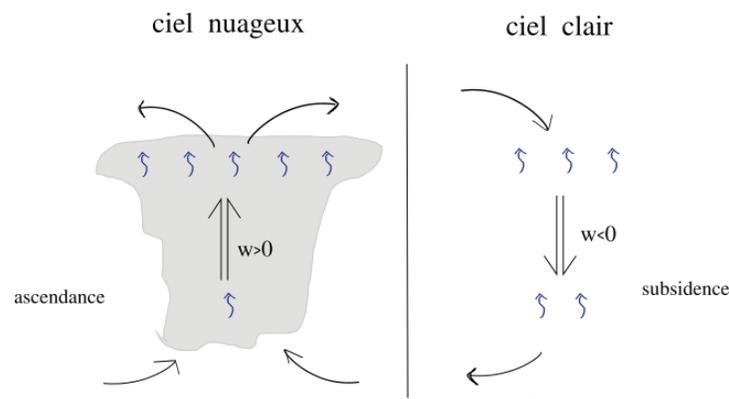


Figure 15: Schéma de la circulation méso-échelle induite entre une zone de ciel clair et une zone de ciel nuageux au cours de la nuit. Les petites flèches courbées bleues représentent le refroidissement radiatif (le nombre de flèches correspond à l'intensité du refroidissement), les doubles flèches noires la vitesse verticale.

Dans une situation avec une stabilité (LTS) renforcée et une troposphère particulièrement sèche entre 400 et 600 hPa (au delà du sommet des nuages), comme dans la colonne de droite de la figure 12, le contraste du refroidissement radiatif entre les zones de ciel clair et nuageux est d'autant plus marqué. La circulation décrite dans la figure 15 pourrait donc être entretenue par la situation, s'intensifier et la convection serait renforcée, ce qui aurait pour effet d'augmenter la couverture nuageuse qui s'étalerait sous l'inversion. Ce phénomène, qui aurait lieu la nuit, pourrait alors amplifier l'amplitude du cycle diurne en plus de la couverture nuageuse moyenne. Cette situation peut donc être reliée aux patterns "Fish" ou "Flower" dont les occurrences sont favorisées par une forte stabilité, et qui sont associés à des structures de ciel clair - ciel nuageux très démarquées (voir aussi Schulz, Eastman, and Stevens 2021).

6.2 Conclusion

L'analyse conduite au cours du stage a montré que toutes les variables environnementales ont une influence sur la moyenne diurne de la fraction nuageuse: celle-ci augmente avec la stabilité (LTS), le vent de surface, la subsidence entre 600 et 700 hPa, et diminue avec l'humidité entre 400 et 600 hPa. Ce résultat vient confirmer ceux d'études précédentes sur le sujet (notamment Mieslinger et al. 2019).

Une relation intéressante n'ayant pas été démontrée auparavant est celle du couple humidité et stabilité (LTS), qui, présentant une forte corrélation négative, joue sur l'amplitude du cycle diurne qui est amplifiée quand la stabilité est élevée et l'humidité faible.

Autre résultat intéressant, on a montré que l'intensité du vent de surface est la seule grandeur qui affecte les nuages très peu profonds, en étant corrélée positivement avec la moyenne diurne de la fraction nuageuse ainsi qu'avec la phase des "very shallow". Autrement, la population de nuages impactée par les conditions environnementales est toujours celle des nuages profonds, les "deeper". Leur cycle diurne pilote celui de la couverture totale et est en phase avec celui-ci.

Ces résultats peuvent expliquer les fortes amplitudes de cycle diurne et les moyennes de fractions nuageuses élevées observées au cours de la campagne Narval - la période étudiée par Vial, Vogel, Bony, et al. 2019 - qui s'est déroulée dans des conditions remarquablement sèches et plus stables que la climatologie, avec un vent et une subsidence intenses. Le couple humidité - stabilité permettrait d'expliquer les fortes amplitudes du cycle diurne pendant Narval ainsi que les différences d'amplitudes entre Narval et Eurec⁴a. De plus, toutes les grandeurs atmosphériques pendant Narval étaient dans des conditions qui conduisent à des fractions nuageuses élevées. Il en est de même pour Eurec⁴a, campagne pour laquelle les paramètres du cycle tels que la couverture moyenne et l'amplitude peuvent être bien expliqués par les variables grande-échelle qui se rapprochaient plus de la moyenne climatologique (par rapport à Narval).

Un autre résultat est celui qui se dégage du lien entre la subsidence et le vent de surface, corrélés positivement. Le cycle diurne obtenu pour un couple vent - subsidence faibles a l'air plus robuste et subit moins de variations que celui correspondant à la situation opposée: vent et subsidence forts. Cette seconde situation présente un cycle diurne très variable avec des phases beaucoup plus étalées et décalées au cours de la nuit (figure 13).

On attire également l'attention sur la façon d'étudier le cycle diurne: une nouvelle analyse des paramètres du cycle a été introduite, permettant d'observer la phase et l'amplitude de manière décorrélée. Au lieu d'observer un cycle moyenné sur une longue période, dont l'amplitude résultant est affaiblie à cause de la grande variabilité des phases, je moyenne séparément la phase et l'amplitude du cycle diurne. Cela évite une lecture trompeuse des graphes de cycle diurne représentés comme dans la figure 4, où un cycle diurne moyen n'a pas l'amplitude moyenne jour à jour, ni la phase moyenne, mais l'amplitude et la phase du cycle moyenné sur une longue période.

Enfin, des suites pourraient être apportées à l'analyse. Notamment, l'étude du comporte-

ment du cycle diurne de la couverture nuageuse en fonction d'autres conditions environnementales telles que le cisaillement de vent, ou bien la vitesse verticale dans les nuages à une altitude d'environ 1 km est à envisager, ces deux grandeurs étant connues pour influencer les cumulus d'alizés et étant susceptibles de jouer un rôle sur leur cycle diurne (Mieslinger et al. 2019, George et al. 2021). Des expériences numériques pourraient être mises en place afin d'étudier plus en détail les liens entre la stabilité (LTS), l'humidité et l'amplitude du cycle diurne, et notamment le mécanisme proposé dans la section 6.1.

References

- [1] Bony and Dufresne. “Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models”. In: *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT* 32 (Oct. 2005). DOI: [10.1029/2005GL023851](https://doi.org/10.1029/2005GL023851).
- [2] Bony, Dufresne, et al. “On dynamic and thermodynamic components of cloud changes”. In: *Climate Dynamics* 22 (2004), pp. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0369-6>.
- [3] Bony, Schulz, et al. “Sugar, Gravel, Fish, and Flowers: Dependence of Mesoscale Patterns of Trade-Wind Clouds on Environmental Conditions”. In: *Geophysical Research Letters* 47.7 (2020). e2019GL085988 10.1029/2019GL085988, e2019GL085988. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL085988>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019GL085988>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL085988>.
- [4] Bony, Stevens, et al. “EUREC4A: A Field Campaign to Elucidate the Couplings Between Clouds, Convection and Circulation”. In: *Surveys in Geophysics* 38 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9428-0>.
- [5] Brueck, Nuijens, and Stevens. “On the Seasonal and Synoptic Time-Scale Variability of the North Atlantic Trade Wind Region and Its Low-Level Clouds”. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 72.4 (2015), pp. 1428–1446. DOI: [10.1175/JAS-D-14-0054.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0054.1). URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/72/4/jas-d-14-0054.1.xml>.
- [6] Christophersen, Foltz, and Perez. “Surface Expressions of Atmospheric Thermal Tides in the Tropical Atlantic and Their Impact on Open-Ocean Precipitation”. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125.22 (2020). e2019JD031997 2019JD031997, e2019JD031997. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD031997>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JD031997>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD031997>.

- [7] George et al. “Observed Impact of Mesoscale Vertical Motion on Cloudiness”. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 78.8 (2021), pp. 2413–2427. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0335.1>. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/78/8/JAS-D-20-0335.1.xml>.
- [8] Gray and Jacobson. “Diurnal Variation of Deep Cumulus Convection”. In: *Monthly Weather Review* 105.9 (1977), pp. 1171–1188. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<1171:DVODCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<1171:DVODCC>2.0.CO;2). URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/105/9/1520-0493_1977_105_1171_dvodcc_2_0_co_2.xml.
- [9] Medeiros and Nuijens. “Clouds at Barbados are representative of clouds across the trade wind regions in observations and climate models”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (May 2016), p. 201521494. DOI: 10.1073/pnas.1521494113.
- [10] Mieslinger et al. “The Dependence of Shallow Cumulus Macrophysical Properties on Large-Scale Meteorology as Observed in ASTER Imagery”. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124.21 (2019), pp. 11477–11505. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JD030768>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JD030768>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD030768>.
- [11] Naumann, Stevens, and Hohenegger. “A Moist Conceptual Model for the Boundary Layer Structure and Radiatively Driven Shallow Circulations in the Trades”. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 76.5 (2019), pp. 1289–1306. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0226.1>. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/76/5/jas-d-18-0226.1.xml>.
- [12] Nuijens and Stevens. “The Influence of Wind Speed on Shallow Marine Cumulus Convection”. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* (2012). DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-02.1>. eprint: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/69/1/jas-d-11-02.1.xml>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD030768>.
- [13] Schulz, Eastman, and Stevens. “Characterization and Evolution of Organized Shallow Convection in the Trades”. In: *Earth and Space Science Open Archive* (2021), p. 34. DOI: 10.1002/essoar.10505836.1. URL: <https://doi.org/10.1002/essoar.10505836.1>.
- [14] Stevens, Bony, et al. “Sugar, gravel, fish and flowers: Mesoscale cloud patterns in the trade winds”. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.726 (2020), pp. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3662>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3662>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3662>.

- [15] Stevens, Farrell, et al. “The Barbados Cloud Observatory: Anchoring Investigations of Clouds and Circulation on the Edge of the ITCZ”. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 97.5 (2016), pp. 787–801. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00247.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/5/bams-d-14-00247.1.xml>.
- [16] Vial, Bony, et al. “Coupling between lower-tropospheric convective mixing and low-level clouds: Physical mechanisms and dependence on convection scheme”. In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 8.4 (2016), pp. 1892–1911. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016MS000740>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2016MS000740>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016MS000740>.
- [17] Vial, Vogel, Bony, et al. “A New Look at the Daily Cycle of Trade Wind Cumuli”. In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11.10 (2019), pp. 3148–3166. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS001746>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019MS001746>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019MS001746>.
- [18] Vial, Vogel, and Schulz. “On the daily cycle of mesoscale cloud organization in the winter trades”. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* n/a.n/a (2021). DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.4103>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.4103>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.4103>.
- [19] Wood and Bretherton. “On the Relationship between Stratiform Low Cloud Cover and Lower-Tropospheric Stability”. In: *Journal of Climate* 19.24 (2006), pp. 6425–6432. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3988.1>. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/19/24/jcli3988.1.xml>.
- [20] Woolnough, Slingo, and Hoskins. “The Diurnal Cycle of Convection and Atmospheric Tides in an Aquaplanet GCM”. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 61.21 (2004), pp. 2559–2573. DOI: 10.1175/JAS3290.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/61/21/jas3290.1.xml>.

A Appendice

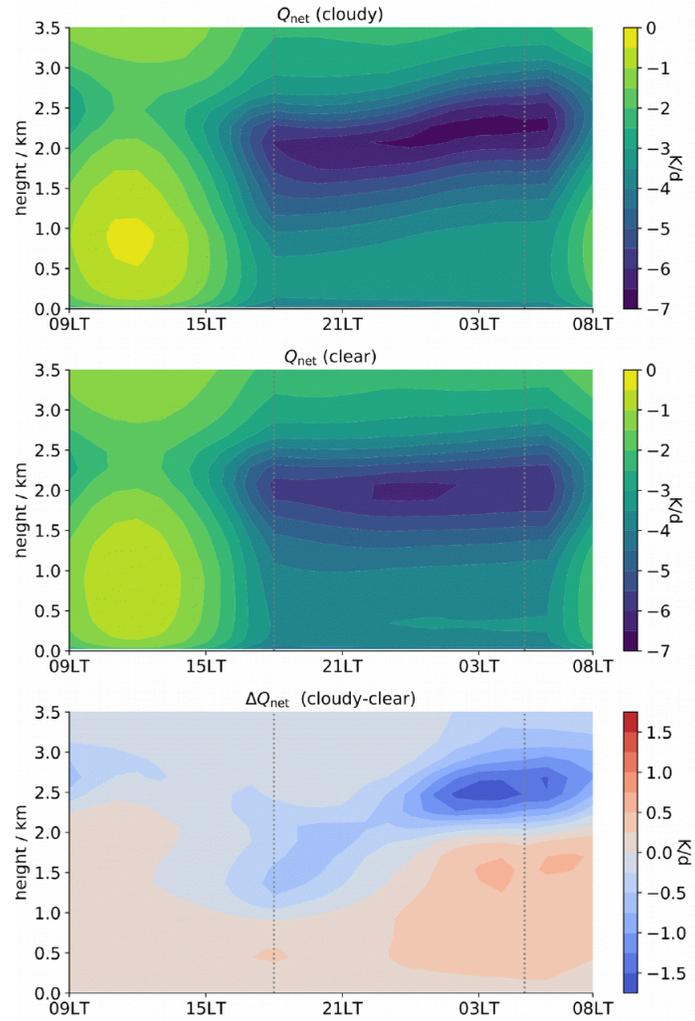


Figure 16: Profils verticaux du refroidissement/chauffage radiatif en fonction de l'heure de la journée, en zone de ciel nuageux (en haut) et zone de ciel clair (au milieu), puis différence entre les deux (en bas, nuageux-clair), en Kelvin jour⁻¹. Le refroidissement radiatif prend des valeurs négatives, dans les tons violets (et le chauffage des valeurs positives en jaune). Figure empruntée à Jessica Vial.

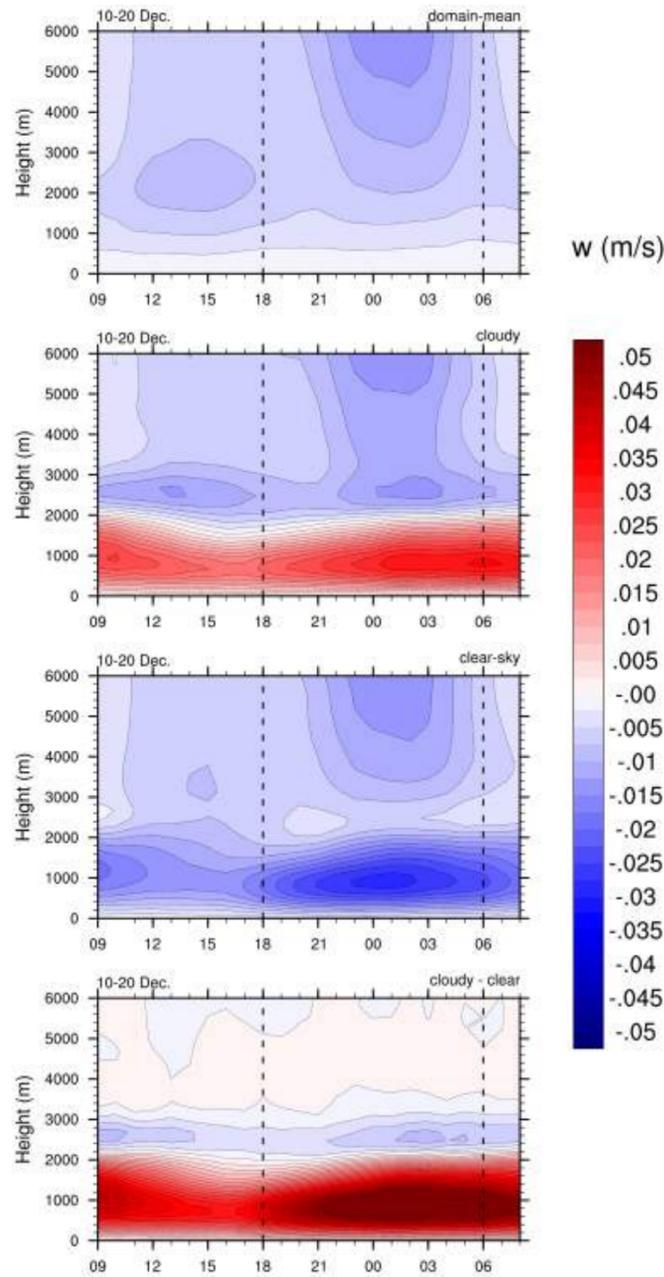


Figure 17: Vitesses verticales dans la troposphère au cours de la journée (et de la nuit), en moyenne (en haut), en zone de ciel nuageux (en second), zone de ciel clair (en troisième), puis différence entre les deux (en bas, nuageux-clair), en $m\ s^{-1}$. Une vitesse verticale positive (en rouge) correspond à des ascendances. Figure empruntée à Jessica Vial.