



PROJET DE RECHERCHE (PRE)

SPÉCIALITÉ : MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

ANNÉE SCOLAIRE : 2021

Reconstruction statistique d'une scène nuageuse

Non confidentiel

Stagiaire : Pierre-Aurélien Stahl
Tuteur Ensta : Francesco Russo

Promotion : 2022
Tuteur organisme d'accueil :
M. JEAN-LOUIS DUFRESNE

Stage effectué du 13 Mai 2021 au 6 Août 2021
Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) : équipe EMC3
4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Note de confidentialité

Le document est non confidentiel. Il peut donc être consultable en ligne par tous.

Résumé

Ce travail est consacré à essayer d'améliorer la compréhension des nuages pour perfectionner les modèles de climat, ainsi qu'à produire une reconstruction d'une scène nuageuse réaliste à partir d'un minimum d'informations statistiques sur les nuages. Les principales caractéristiques des nuages sont étudiées dans un premier temps en analysant des champs nuageux 3D issus de simulations à haute résolution dites LES. Ces informations seront utiles pour guider la construction de la scène de synthèse dont le réalisme sera évalué en calculant l'effet radiatif des nuages. Ensuite, plusieurs algorithmes sont envisagés pour recréer un nuage en respectant des contraintes autant géométriques que thermodynamiques avec le contenu en eau liquide moyen et sa variabilité horizontale. Ces nuages sont ensuite assemblés dans différentes configurations pour créer une scène nuageuse de la taille des LES. Cette scène synthétique est alors soumise à une simulation par Monte-Carlo qui calcule le flux radiatif de la scène pour un angle solaire donné, en envoyant des photons parallèles entre eux dans une direction choisie.

Mots-Clés : Processus nuageux, Modélisation physique, Modèles de climat, Caractérisation statistique, Géométrie nuageuse, Recouvrement nuageux, Reconstruction scène nuageuse, Simulation LES, Transfert radiatif

Abstract

This internship has two goals. The first one is to improve the cloud comprehension to perfect climate models. The second one is to create a cloud scene reconstruction with the minimum of global data and no information on clouds. The main characteristics of clouds will be studied in the first part of the internship with the analysis of cloud scene which come from a high-resolution simulation call LES. This data will be useful to guide the cloud reconstruction and will be key for the radiation balance. Then some algorithms will be implemented to recreate a cloud with geometry and thermodynamical constraints. Those clouds are then assembled in various configurations to create a cloud scene with the size of the LES. Those synthetic scenes are then tested with a Monte-Carlo radiative simulation which calculates the radiative flux of the scene for a fixed solar angle by launching parallel photons.

Keywords : Cloud process, Physical modelling, Climate models, Statical characterisation, Cloud geometry, Cloud overlap, Cloud scene reconstruction, LES simulation, Radiative transfer

Remerciements

Je voudrais remercier chaleureusement M. Jean Louis Dufresne, M. Raphael Lebrun et Mme. Najda Villefranque pour leur aide, soutiens et gentillesse tout au long de mon stage. Ces encadrants si patients et pédagogues ont grandement contribué à cette belle expérience de douze semaines.

Je voudrais aussi remercier Mme Laure Giovangigli pour ses précieux conseils lors de la recherche de stage ainsi que pour le choix de l'enseignant référent.

Table des matières

Introduction	1
1 Présentation des objectifs, méthodes et données	2
1.1 Contexte et objectifs	2
1.1.1 Contexte scientifique	2
1.1.2 Contexte projet	3
1.2 Méthodologie et premières descriptions	3
1.2.1 Méthode	3
1.2.2 Utilisations et aperçu des données	4
2 Analyse statistique des nuages	6
2.1 Profils verticaux du contenu en eau liquide et de la fraction volumique	6
2.1.1 Fraction volumique	6
2.1.2 Contenu en eau liquide	7
2.2 Bases et sommets des nuages	8
2.2.1 Définitions	8
2.2.2 Répartitions des bases, des sommets et des hauteurs des nuages	10
2.3 Structure verticale des nuages	12
2.3.1 Recouvrement de couches adjacentes	12
2.3.2 Calcul du paramètre de recouvrement	13
2.3.3 Résultats	14
2.4 Distribution horizontale du contenu en eau en fonction de la distance au bord	15
2.4.1 Quantité d'eau moyenne en fonction de la distance au bord	15
2.4.2 Répartition en décile	16
3 Reconstruction de scène nuageuse	20
3.1 Reconstruction d'un nuage	20
3.1.1 Informations disponibles	20
3.1.2 Construction d'un nuage	20
3.1.3 Résultat de cette reconstruction	23
3.1.4 Séparation de l'eau en deux zones	24
3.2 Reconstruction de la scène initiale	25
3.2.1 Construction	25
3.2.2 Comparaison radiative de cette scène avec l'originale	25
3.3 Reconstruction de N nuages identiques	27
3.3.1 Construction	27
3.3.2 Comparaison radiative de cette scène avec l'originale	29
3.4 Procédé pour reconstruire une scène	29
Conclusion	31
Glossaire	32
Références	33
Annexes	34

A	Illustration de la scène nuageuse	34
A.1	Nuages en 3D	34
A.2	Profils de fraction volumique	35
A.3	Graphes d'eau liquide	36
A.3.1	Profils d'eau liquide par niveau	36
A.3.2	Profils d'eau liquide moyenne par niveau	37
A.4	Base et sommet	38
A.4.1	Base par rapport à un pourcentage de la fraction surfacique	38
A.5	Alpha	39
B	Reconstruction	40
B.1	Reconstruction d'une scène déjà existante	40
B.2	Boîte à moustache des déciles	41

Introduction

Les modèles de climat actuels ne possèdent pas de représentation des nuages assez fine. Pourtant, il est connu qu'ils jouent un rôle prépondérant dans le bilan radiatif de la terre. Il est alors important d'affiner la connaissance pour améliorer leur représentation dans les modèles. C'est un des buts de l'équipe dans laquelle j'ai travaillé. Leur deuxième objectif en lien avec le premier est de simuler un bilan radiatif de la terre sous différentes hypothèses pour quantifier au mieux les effets du changement climatique. Pour cela, il faut à partir des sorties du modèle de climat reconstruire des nuages pour pouvoir faire un bilan radiatif par Monte-Carlo. Mon stage s'inscrit dans ces deux objectifs : je devais trouver des informations qui caractérisent les nuages à partir de simulations hautes résolutions (LES) pour ensuite faire une scène nuageuse à partir des données sortant seulement du modèle de climat.

Dans un premier temps, je vais présenter les objectifs méthodes et données utilisées dans le cadre de ce stage. Ensuite je vais faire une première analyse des nuages pour trouver des caractéristiques pour guider la reconstruction. Enfin je vais expliquer comment j'ai conduit les différentes reconstructions ainsi que leurs résultats.

Mon stage s'est déroulé dans le laboratoire de météorologie dynamique (LMD) situé à l'Université Pierre et Marie Curie à Paris. J'ai été encadré par M. Jean Louis Dufresne (Directeur de Recherche CNRS), Mme Najda Villefranque (Post-Doctorante) et M. Raphaël Lebrun (Doctorant). Les trois travaillent sur le projet. Ils m'ont parfaitement encadré malgré les conditions sanitaires qui imposaient un fonctionnement en hybride.

1 Présentation des objectifs, méthodes et données

1.1 Contexte et objectifs

1.1.1 Contexte scientifique

Un des buts de l'équipe avec qui je travaille est d'améliorer les modèles de climat et de météo. Ce sont quasiment les mêmes modèles pour la partie atmosphérique, mais ils ne tournent pas à la même résolution (taille horizontale des mailles) : les modèles de climat tournent avec des résolutions horizontales de l'ordre de 100km alors que les modèles de météo tournent sur des échelles inférieures à 10 km. Dans la partie atmosphérique de ces modèles il y a différentes composantes. La première composante résout la mécanique des fluides avec les équations de Navier-Stokes qui gèrent l'évolution couplée des températures, du vent, de l'humidité et de la pression sur un maillage. Ce maillage peut représenter toute la Terre. La seconde composante de ces modèles, plus "physique", correspond aux termes sources qui apparaissent dans la formulation distribuée dans les équations de Navier-Stokes et qui correspond au processus sous maille d'une part, aux processus autres que ceux donnés par la mécanique des fluides (comme les échanges par rayonnement, ...) d'autres part. Certains de ces processus sous-mailles sont des processus nuageux (pour les petits nuages comme les cumulus par exemple). Ici, la condensation de la vapeur d'eau en nuage dégage de la chaleur (dite "latente"), et les nuages modifient alors l'équilibre radiatif local : ils réfléchissent le soleil (effet d'albedo), ils absorbent le rayonnement thermique émis par la terre et en émettent (effet de serre). S'il y a formation de précipitations (pluie ou neige) cela modifie la turbulence, l'évaporation des précipitations sous le nuage fait refroidir l'air etc. Pour tous ces processus, on fait des "mini modèles" qu'on appelle des paramétrisations, et qui concrètement sont exécutés les uns à la suite des autres et indépendamment dans chaque colonne du modèle. Par exemple le rayonnement a une paramétrisation.

Une partie reste cependant encore très mal modélisée : il s'agit de l'interaction entre les nuages et le rayonnement. Or il est connu qu'il s'agit d'un enjeu clé pour l'évolution du climat. Par exemple, si l'on change un tout petit peu les nuages, on change grandement le bilan radiatif global. Il est donc important de contraindre ces processus. Pour les comprendre, des modèles très précis servent de référence : pour les nuages ce sont les modèles à haute résolution appelés "Large-Eddy Simulations" (LES) qui produisent des séries temporelles de champs 3D détaillées en résolvant quasiment tous les processus explicitement (par la mécanique des fluides). Il reste dans les processus non résolus la microphysique (taille des gouttes, formation des précipitations...) et le rayonnement. Ces LES donnent finalement des champs 3D évoluant dans le temps de température, pression, vents, humidité, contenu en eau liquide (ainsi qu'en pluie, en glace, en neige, mais dans les cumulus étudiés ici il n'y en a pas - ou peu).

A partir de ces simulations il est donc possible d'étudier les caractéristiques des nuages pour mieux les connaître, d'essayer de les comprendre et in fine utiliser cette meilleure compréhension pour améliorer les paramétrisations des modèles de grande échelle. Il est également possible d'utiliser ces champs nuageux détaillés comme donnée d'entrée à des codes de rayonnement de référence comme celui utilisé dans ce travail et dans lequel les échanges radiatifs sont calculés par une méthode de Monte-Carlo. Il s'agit d'une méthode numérique statistique qui consiste à échantillonner des trajectoires de photons par exemple depuis le soleil jusqu'au sol. Cela permet de faire le lien entre les caractéristiques des nuages et leur effet radiatif. C'est-à-dire comment ils modifient les flux d'énergie solaire reçus en surface ou renvoyés vers l'espace par rapport à une scène sans nuages. On cherche aussi à

mieux comprendre ces processus radiatifs à l'échelle du champ nuageux et les liens entre les caractéristiques de la population de nuages et l'effet radiatif du champ nuageux pour améliorer la représentation du rayonnement dans les modèles de grande échelle.

1.1.2 Contexte projet

En plus d'essayer d'améliorer les modèles de grande échelle, l'équipe est impliquée dans un projet dont le but est de calculer par Monte Carlo le bilan radiatif global terrestre en conditions normales et en conditions où on a doublé la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, pour estimer de manière précise et rapide ce qu'on appelle le "forçage radiatif" : différence de flux radiatif net au sommet de l'atmosphère en condition normale et en condition CO₂ doublés). Normalement le bilan d'énergie de la terre devrait être fermé c'est à dire que la Terre émet autant de rayonnement infrarouge que ce qu'elle reçoit en rayonnement solaire une fois que l'on a enlevé ce qui est réfléchi par les nuages et la surface. C'est le cas si le système se trouve à l'équilibre. Quand on augmente la concentration en CO₂, on augmente l'effet de serre, ce qui fait que le rayonnement infrarouge émis par la terre est plus petit que le rayonnement solaire reçu. Cela crée un déséquilibre énergétique et pour revenir à l'équilibre il faut que la terre émette plus de rayonnement infrarouge et pour cela il faut que la température augmente (le rayonnement émis par un corps noir est proportionnel à sa température à la puissance de quatre). Donc l'augmentation de la température va dépendre de ce "forçage radiatif" ou déséquilibre radiatif au sommet de l'atmosphère. Pour le calculer, comme on ne peut pas faire tourner des LES sur toute la terre pendant 100 ans à cause d'un temps de calcul gigantesque, on utilise les sorties des modèles de climat. Et c'est pour ça qu'on a besoin de reconstruire des champs nuageux 3D à partir de chacun des profils 1D issus des paramétrisations des modèles de grande échelle.

Pour résumer, ce projet possède un double objectif : faire de la recherche fondamentale pour mieux comprendre les nuages et leurs effets radiatif ainsi qu'une recherche appliquée qui a pour but de concevoir des procédures de génération de champs nuageux 3D à partir de profils verticaux.

1.2 Méthodologie et premières descriptions

1.2.1 Méthode

On veut savoir de quelles informations on a besoin pour générer un champ nuageux à partir d'un profil 1D, en plus de celles déjà disponibles en sortie des modèles de climat (profil de fraction nuageuse et profil de contenu en eau liquide). Par exemple, il faut caractériser la façon dont les nuages se recouvrent sur la verticale, l'hétérogénéité horizontale de l'eau liquide, le nombre de nuages, leurs tailles, leurs épaisseurs... On extrait ces informations des champs nuageux simulés par LES. En regardant les nuages comme des "objets" cohérents dans l'espace (identifié par un algorithme) et on regarde les statistiques de populations de nuages. Ensuite on cherche à utiliser une ou plusieurs de ces informations pour générer un champ nuageux qui aurait les mêmes caractéristiques que le champ d'origine. Pour savoir à quel point il faut contraindre le champ nuageux généré, on teste la qualité de la reconstruction du point de vue des effets radiatifs du champ d'origine vs du champ reconstruit. On veut qu'en moyenne les nuages réfléchissent le soleil de la même façon dans le nouveau champ que dans le champ d'origine. Pour ça, est ce qu'il faut exactement le même nombre de nuages ? Faut-il qu'ils aient la même taille ? Ou la même forme ? Ou la même variabilité horizontale de l'eau liquide ? Ou la même hauteur de base et de sommet ? Bref il faut essayer de savoir ce qui compte dans ce but.

1.2.2 Utilisations et aperçu des données

Ici, on va travailler avec plusieurs champs tridimensionnel de cumulus issus simulations de simulation de la couche limite continentale. Elle est petite de taille : 6 km de coté et 4km de haut. Cette simulation est bien plus précise que les modèles de climat car elle est maillée par des cubes de 25m de coté. La figure (1) montre à quoi ressemble les scènes nuageuses vues de dessus. La fraction surfacique (proportion de colonnes comportant au moins une cellule nuageuse) de cette scène est 0.25 pour 59 nuages. La figure (4) montre un des nuages. C’est le 3ème plus gros nuage détecté. Comme attendu, le nuage a une forme complexe. Les figures (56) à (61) en annexe montre la pluralité des formes de nuages. Si l’on regarde ce nuage par niveau, les couches proches de la base sont connexes alors que celles proche du sommet de le sont pas du tout. De plus les nuages ne se recouvrent quasiment pas puisque l’écart entre la fraction surfacique globale et la somme de toutes les fractions surfaciques des nuages pris individuellement est de 1%.

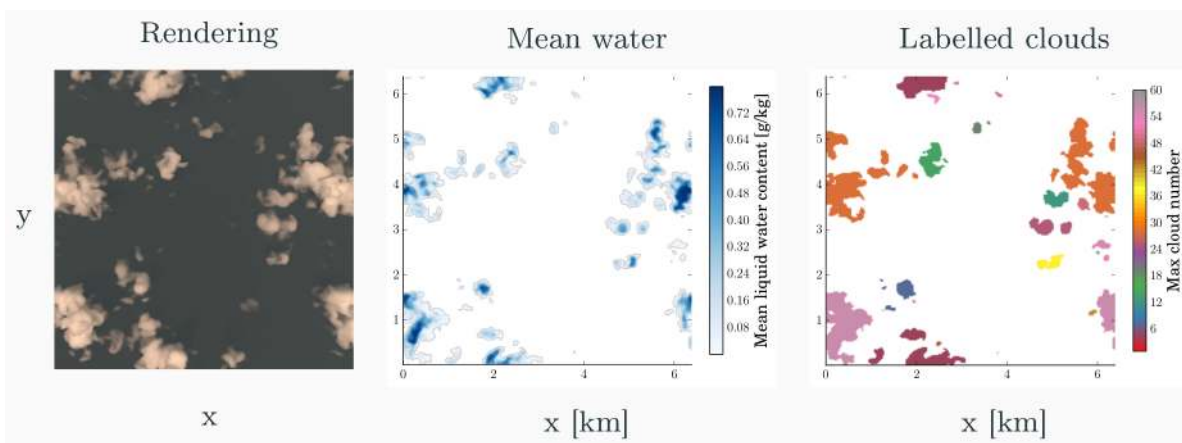


FIGURE 1 – Aperçu de la scène

La figure (2) est un aperçu de la taille des nuages en fraction surfacique. La première observation est que la taille des nuages est très disparate. Une dizaine de nuages semblent très grand comparé au reste et une bonne moitié semble être de plus petite taille. En effet, en comparant la contribution de chaque nuage à la fraction nuageuse totale (figure 3), on distingue un ensemble de 10nuages qui représente 80% de la fraction surfacique, et un ensemble de 20 nuages représentant 95% de la fraction surfacique, les 39 autres de représentant que 5%.

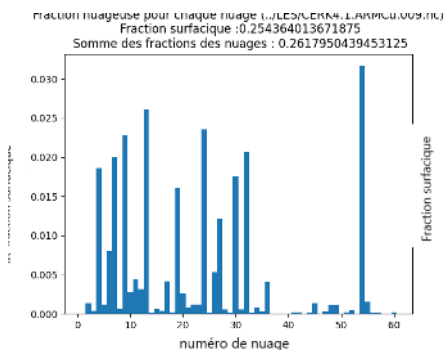


FIGURE 2 – Fraction surfacique de chaque nuage de la scène

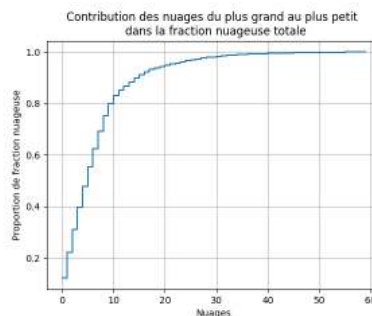


FIGURE 3 – Fonction de répartition de la fraction cumulée par nuage décroissant

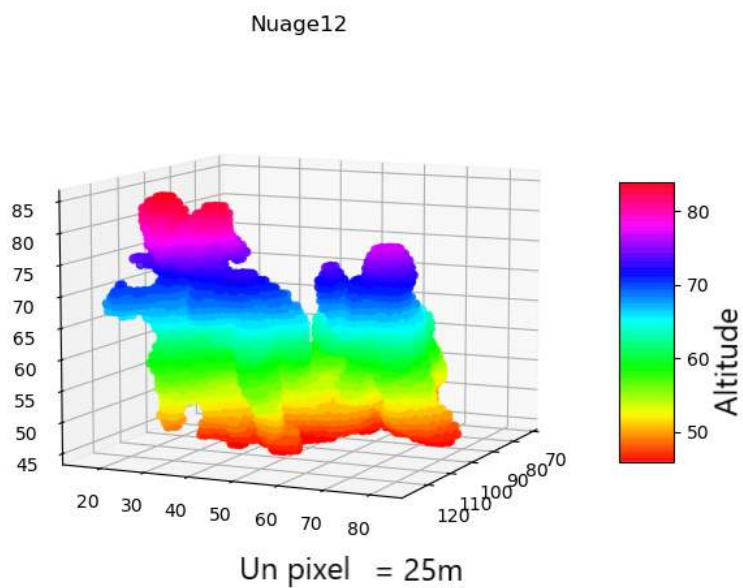


FIGURE 4 – Vue 3D d'un nuage (n°12)

2 Analyse statistique des nuages

Cette partie a pour but de caractériser au mieux les nuages en vue d'une reconstruction réaliste.

2.1 Profils verticaux du contenu en eau liquide et de la fraction volumique

2.1.1 Fraction volumique

La fraction volumique des nuages, c'est à dire la proportion du volume de mailles contenant des gouttelettes d'eau, à une altitude donnée de la scène fait partie des rares informations disponibles en sortie des modèles de climat. Mais cette grandeur correspond à toute la scène nuageuse, on a pas cette information pour les nuages individuellement. On cherche le lien entre le profil moyen (de la scène) et les profils individuels pour reconstruire plus facilement. La figure (5) représente la fraction volumique de la scène. Il est possible de voir que le maximum de fraction volumique se trouve assez bas dans la scène nuageuse et qu'il diminue assez lentement jusqu'au sommet de la scène nuageuse avec un léger regain à mi-hauteur. La figure (6) est la fraction volumique du nuage représenté en 3D plus haut (figure 4). On voit que le maximum de fraction volumique est atteint très bas. Mais contrairement à la scène globale, il y a un vrai deuxième pic et après une diminution.

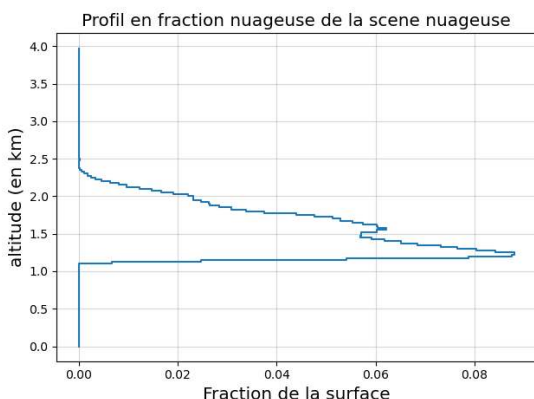


FIGURE 5 – Profil vertical de la fraction volumique de la scène nuageuse

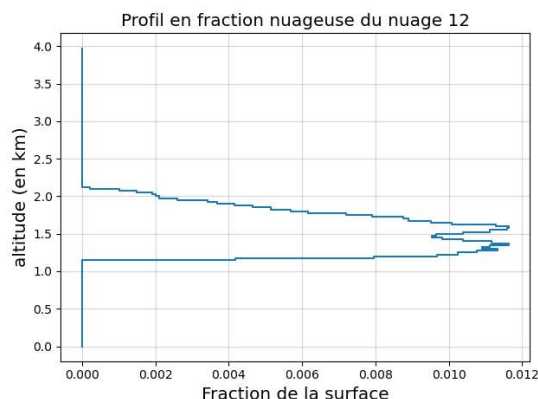


FIGURE 6 – Profil vertical de la fraction volumique d'un nuage (n°12)

Les figures dans la partie A.2 en annexe montrent d'autres nuages. Par exemple, les numéros 23 et 29 (figures 63 et 65) ont comme la scène globale un pic unique assez marqué. Le nuage 53 (figure 62) a lui une fraction qui ressemble au nuage montré plus haut (6) avec deux pics marqués assez bas. Enfin les nuages 6 et 26 (figures 64 et 66) ont trois pics assez marqués avec le plus gros pic qui n'est pas le plus bas contrairement aux autres.

A priori on ne peut donc pas utiliser directement cette information de la scène nuageuse pour reconstruire les nuages individuellement. En effet, les courbes de fraction volumique ne sont pas semblables au graphique global (de la scène). Cependant, plusieurs pistes restent possible pour caractériser la forme de cette courbe en vue de la reconstruction.

La première est de classer les profils individuels par exemple en fonction de leur nombre de pics. Il serait aussi possible d'affiner ce regroupement par leur numéro de pics le plus fort. Pour la reconstruction, il suffirait de tirer dans cette distribution pour chaque nuage.

Pour trouver une telle distribution et être sûr qu'elle soit significative, il faudrait étudier beaucoup plus de scènes nuageuses que ce qui a été fait dans le cadre de ce stage.

La seconde est de considérer que tous les nuages reconstruits n'ont qu'un seul pic avec une forme type. Elle aurait un pic assez bas puis une diminution lente. Les nuages réels seraient alors approchés par une superposition de nuages à un pic commençant à des altitudes différentes.

La première technique à l'avantage de ne pas avoir à gérer des recouvrements de nuages et de conserver la distribution de base et de sommet (voir ci dessous). La seconde permet elle de normaliser la forme des nuages créés et donc de simplifier le processus de reconstruction. Aucune des deux possibilités n'a cependant pas été testé de manière significative. Vu que aucune des deux ne semblent pour l'instant être prédominante sur l'autre, elle mériterait un meilleur approfondissement.

2.1.2 Contenu en eau liquide

Tout comme la fraction volumique, le profil vertical du contenu en eau liquide (en kg d'eau par kg d'air) de la scène entière fait partie des informations disponibles pour la reconstruction. Mais comme précédemment, cette information moyenne n'est pas détaillée pour chacun des nuages. Il faut regarder s'il existe des liens entre la courbe globale et les courbes des nuages. La figure (7) qui représente la scène entière et la figure (8) qui représente le nuage déjà illustré plus haut semblent être assez proches. Les deux ont à peu de choses près le même profil avec un pic à mi-hauteur du nuage. Mais ce n'est pas le cas pour tous les nuages. En annexe dans la partie A.3.1, il est possible de voir que les 5 plus gros nuages ne suivent pas du tout ce profil. Les figures (68), (69) et (71) montrent deux pics distincts quand les figures (70) et (72) en montrent clairement trois. On se retrouve avec un problème ressemblant à celui des fractions volumiques.

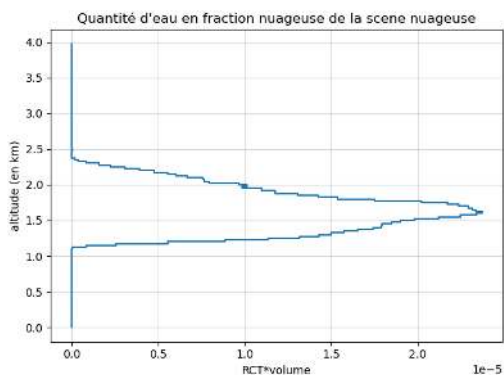


FIGURE 7 – Eau liquide par niveau pour la scène totale

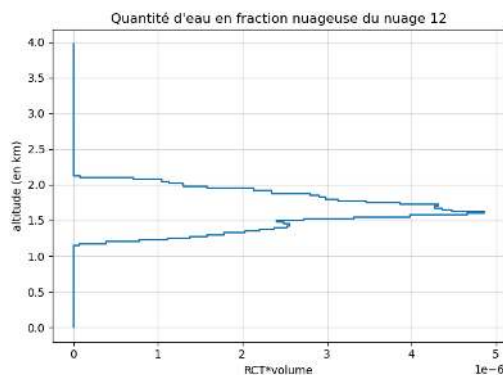


FIGURE 8 – Eau liquide par niveau d'un nuage (n°12)

Mais il est assez évident qu'il y a une corrélation entre le profil vertical du contenu en eau liquide et celui de la fraction volumique. En effet, plus il y aura de mailles nuageuses dans un niveau, plus la quantité d'eau à l'intérieur du niveau sera importante. Le problème est donc le même que précédemment. Donc il vaut mieux analyser la valeur moyenne de l'eau à chaque niveau uniquement dans les mailles nuageuses pour pouvoir ensuite traiter le problème de l'eau de manière indépendante de celui de la fraction volumique. La thermodynamique stipule que plus l'air est froid, moins il peut contenir de vapeur d'eau et plus il est amené à

contenir de l'eau liquide à quantité d'eau totale équivalente. C'est ce qui se passe lorsqu'un volume d'air s'élève sans se mélanger avec son environnement. En regardant les figures (9) et (10) mais aussi les figures en annexe dans la partie A.3.2 avec les figures (74) à (79), il est possible de voir des similitudes de forme de courbes ainsi d'ordre de grandeur pour la quantité moyenne d'eau liquide. Elles sont globalement toutes croissantes avec l'altitude. On peut cependant y voir de légères différences. Par exemple le second pic de la scène totale (figure 9) s'explique par le fait qu'un nuage se détache de tous les autres et il y a une absence de nuages sur 50m vers les 2.4km d'altitude. Les autres pics des autres figures, notamment en annexe, peuvent s'expliquer par le fait que la valeur en eau liquide pour une cellule proche du bord est plus faible que pour les cellules éloignées (cela va être expliqué dans la partie 2.4).

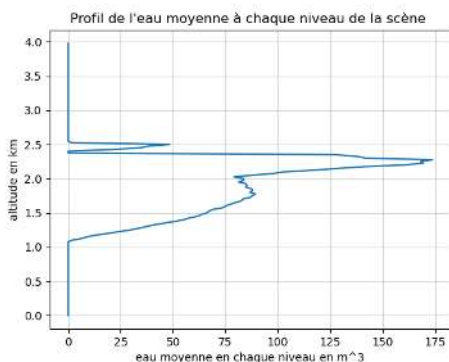


FIGURE 9 – Eau liquide moyenne par cellule en fonction de l'altitude pour la scène totale

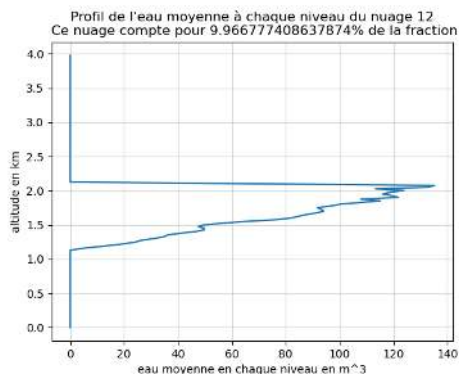


FIGURE 10 – Eau liquide moyenne par cellule en fonction de l'altitude d'un nuage (n°12)

Pour garantir le plus d'indépendance possible pour la reconstruction, il est plus logique de regarder l'eau liquide moyenne par cellule nuageuse plutôt que l'eau moyenne sur toute les cellules. La variation horizontale (ie sur un même niveau) de l'eau liquide par cellule nuageuse sera analysé dans la partie 2.4.

2.2 Bases et sommets des nuages

Dans l'optique de pouvoir reconstruire les nuages statistiquement, il est important de connaître des informations sur la position verticale des nuages

2.2.1 Définitions

Une première idée pour définir la base des nuages est de dire que le point le plus bas du nuage définit cette base et le sommet comme le point le plus haut. C'est une définition très simple qui peut être implémentée rapidement. Voici les résultats qui peuvent être observés :

La figure (11) permet de voir que les bases (avec cette définition) des nuages sont à peu près toutes à la même altitude (entre 1.1 et 1.2 km) alors que l'altitude des sommets est plus variée. Cette représentation permet de voir également que les nuages n'ont pas une forme similaire car des nuages ayant une fraction surfacique plus grande n'ont pas forcément l'épaisseur la plus grande. Mais globalement il y a une tendance à ce que deux nuages très distincts en fraction surfacique aient une épaisseur très éloignées. Enfin, on peut (cf partie 1.2.2) observer que les 40 plus petits nuages représentant 5% de la fraction surfacique

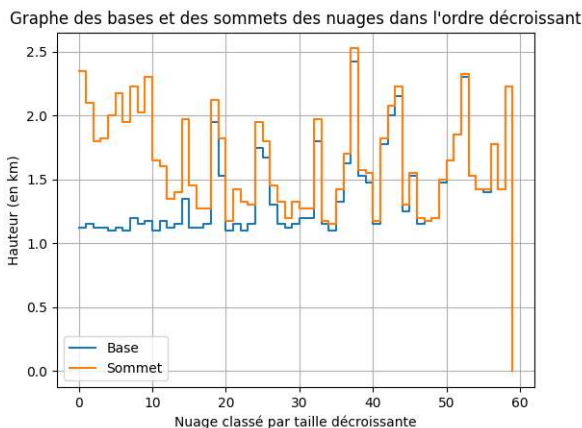


FIGURE 11 – Tracé des bases et des sommets pour la définition très simple (points nuageux extrême)

totale sont très fins : pour beaucoup, il est impossible de distinguer la base et le sommet du nuage car le nuage est en une seule maille d'épaisseur.

Mais ce choix de base semble être un peu trop grossier pour l'objectif initial. En effet considérer que le nuage est significatif pour les premiers niveaux alors qu'il ne possède qu'une poignée cellules par niveau paraît un peu limite. Regardons maintenant s'il est possible de l'affiner en apportant des avancées significatives.

Dans un premier temps, il est intéressant d'observer les figures 3D pour essayer de définir un critère pour la base. Pour les nuages 53, 23 et 6 (cf figures 56, 57 et 58), la base minimale est très proche de la base que l'on définirait ici. En effet les premières cellules définissent à peu de choses près un recouvrement significatif. En comparant ces impressions sur les profils d'altitudes (figures (56), (57) et (58)), il est clair qu'un pourcentage de la fraction surfacique totale permettrait d'obtenir une définition. Un seuil de 30% de la fraction surfacique totale semble suffire.

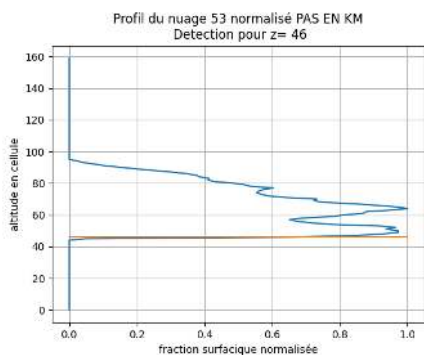


FIGURE 12 – Base pour un seuil de 30 % de la fraction surfacique normalisée par la fraction du nuage

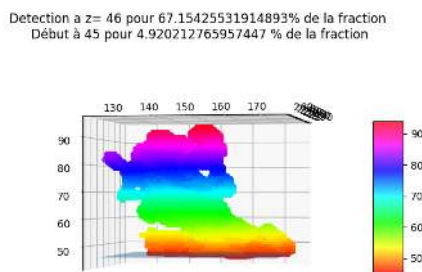


FIGURE 13 – Base pour un seuil de 30 % de la fraction surfacique normalisée

Les figures (12) et (13) ainsi que les figures (80) à (83) en annexe partie A.4.1 montrent bien que ce choix de base est justifié pour des nuages de cette forme. D'ailleurs, la définition du point le plus bas et la définition par seuil donnent presque le même résultat à une cellule près, c'est à dire à 25m près ce qui est extrêmement peu.

Mais pour certains nuages, cette définition est trop limite comme pour le nuage 26 (figure (85) en annexe). L'idée est de faire un seuil non pas sur la fraction surfacique du nuage mais sur le premier pic. Et pour éviter des scénarios où la base choisie ne semble pas être convenable (comme à la figure (14)), il faut dire à partir de quand le pic est significatif. Pour que tout marche bien le seuil sur le pic est de 40% de la fraction surfacique du nuage.

Detection a z= 48 pour 0.8561643835616438% de la fraction
Début à 48 pour 0.8561643835616438 % de la fraction

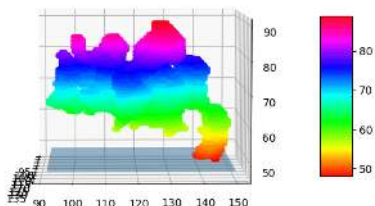


FIGURE 14 – Base nuage 29 en seuil sur le premier pic

Detection a z= 61 pour 32.705479452054796% de la fraction
Début à 48 pour 0.8561643835616438 % de la fraction

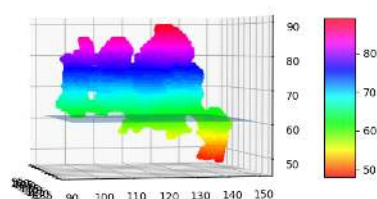


FIGURE 15 – Base nuage 29 en seuil sur le premier pic significatif

Les figures (16) et (17) sont les tracés des bases et des sommets selon la méthode la moins contraignante (premier et dernier point du nuage) et la méthode la plus contraignante (avec des seuils sur les pics). Il n'y a pas de différence marquante entre les deux graphes sauf pour les nuages 26 et 29 déjà mentionnés et pour lesquels la définition même d'une base est problématique. Donc finalement, mise à part ces deux nuages, il est presque équivalent de travailler avec des seuils ou avec les extremums du nuage comme base et sommet. De plus ce choix est moins arbitraire et moins susceptible de varier avec des formes diverses. C'est donc la première définition de base qui est retenue.

Graphe des bases et des sommets des nuages dans l'ordre décroissant

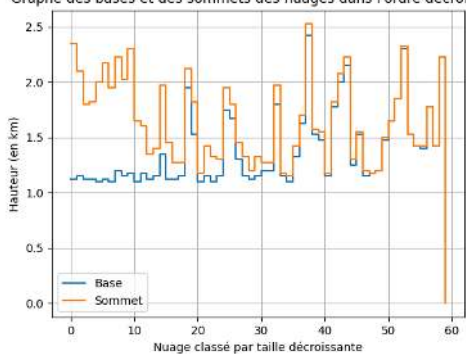


FIGURE 16 – Base et sommet maximum

Graphe des bases et des sommets des nuages dans l'ordre décroissant

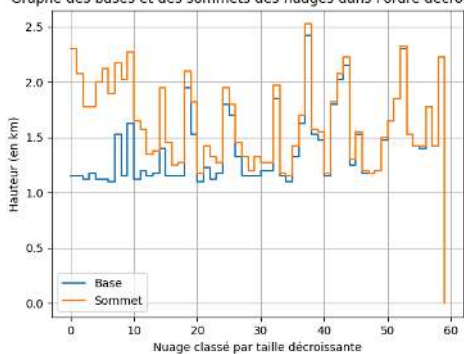


FIGURE 17 – Base et sommet avec méthode de seuil

2.2.2 Répartitions des bases, des sommets et des hauteurs des nuages

Dans cette partie, on va considérer que la base et le sommet de chaque nuage sont définis par ses extremums.

Maintenant que le choix d'une base à été fait, nous allons étudier la répartition statistique pour une scène nuageuse en pondérant par la fraction surfacique de chaque nuage pour donner plus de poids aux nuages de grande surface. Les figures (18) et (19) nous montrent que l'altitude des bases des nuages sont très proches. Cela valide l'idée précédente que l'on avait émise grâce au graphique (11). Les bases sont donc essentiellement regroupées entre 1.1 et 1.15 km. Cette altitude correspond à l'altitude de la couche limite où les nuages commencent à se former. Cependant il existe des nuages ayant une base plus haute mais ils sont très peu présents du fait de leur fraction surfacique très faible. Ce sont probablement des nuages qui sont en train de disparaître. Pour la reconstruction, il va être possible de considérer que les bases des nuages se situent à la même hauteur. Enfin, si l'on considère que les courbes de fraction volumique sont calculées avec la technique utilisant la population de forme, les nuages auront la même base. Car dans l'autre choix de fraction volumique (tous les nuages auraient un seul pic avec une superposition des nuages), il est évident que les bases ne soient pas à la même hauteur. Il n'y a pas eu pour le moment d'étude sur ces altitudes des bases dans cette hypothèse. Après cette observation sur l'altitude des bases, on a plutôt tendance à valider la première possibilité sur la fraction volumique.

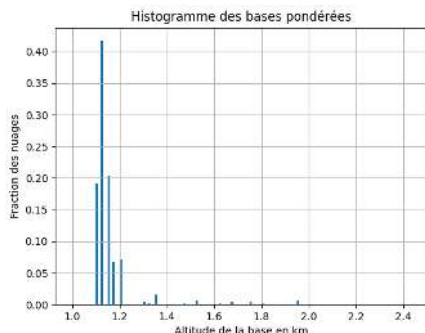


FIGURE 18 – Histogramme de l'altitude de la base des nuages pondérée par la fraction relative de chacun des nuages

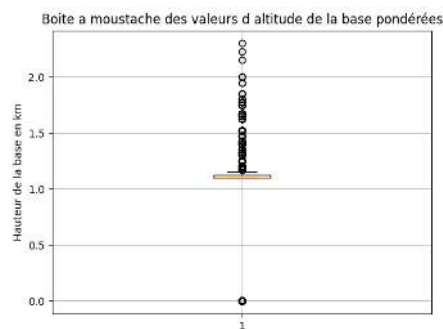


FIGURE 19 – Diagramme moustache de la même altitude que la figure 18

La distribution de sommets est beaucoup moins piquée que celles des bases. Les figures (20) et (21) montrent que les altitudes des sommets des nuages sont très variables. 50 % des sommets (dans la rectangle de la figure (21)) sont compris entre 1.8 et 2.2 km avec une grande variabilité. Mais un nombre non négligeable de sommets se trouvent en dessous de ce bloc. Enfin on retrouve en nombre négligeable des sommets vers 1.2 km qui correspondent aux nuages très fins. Tous ces résultats sont comme pour les bases, calculés pour des nuages possédant une courbe de fraction volumique possédant plusieurs pics.

Les altitudes ne sont pas aussi regroupées que les bases. On ne peut pas considérer que tous les nuages aient la même épaisseur. C'était attendu car les nuages sont de formes différentes et possèdent la même base. Donc une altitude de sommet différente. Plusieurs hypothèses sont alors possibles pour caractériser ces altitudes. La première est de tirer de manière aléatoire l'épaisseur. La seconde est de faire une épaisseur proportionnelle à la fraction surfacique du nuage choisi. C'est à dire que plus un nuage aura une grande fraction surfacique, plus il sera épais. La figure (22) montre un lien entre la fraction surfacique et l'épaisseur. On voit assez bien que les nuages ayant des fractions surfaciques faibles ont une épaisseur faible. Pour les gros nuages, il y a une tendance à ce que les nuages les plus épais soient ceux qui ont la plus grosse fraction surfacique mais cela n'est pas toujours vérifié. Il faudra donc être prudent lors de la reconstruction pour la relation épaisseur fraction surfacique.

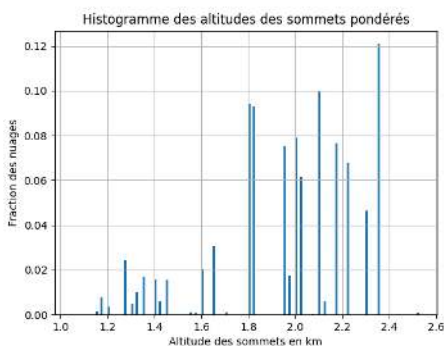


FIGURE 20 – Histogramme de l'altitude des sommets des nuages pondéré par la fraction de chacun

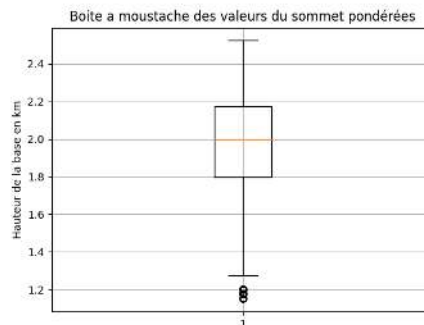


FIGURE 21 – Représentation des données de la figure 20 en boîte à moustache

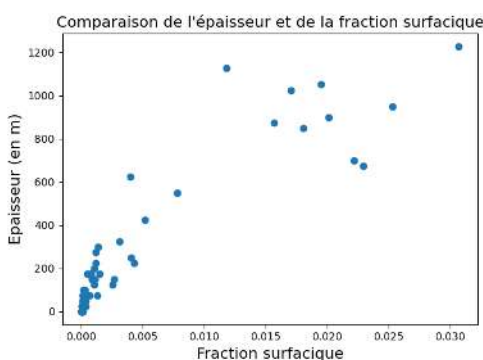


FIGURE 22 – Comparaison de la fraction surfacique et de l'épaisseur

2.3 Structure verticale des nuages

La structure verticale du nuage fait partie des éléments qui vont caractériser le nuage d'un point de vue radiatif.

2.3.1 Recouvrement de couches adjacentes

Un modèle de recouvrement des couches nuageuses est proposé par Hogan [2] dans son article publié en 2000. Il est défini par la façon dont deux couches adjacentes se recouvrent. Il définit deux types fondamentaux. Le premier est le recouvrement maximum (figure 23). Il se produit lorsque l'une des deux couches est entièrement recouverte par l'autre. Dans ce cas, le recouvrement est :

$$C_{max} = \max(c_a, c_b) \quad (1)$$

avec c_a et c_b la fraction surfacique de chaque couche. Le deuxième cas est le recouvrement aléatoire. Il se trouve lorsque les deux couches successives ont des parties disjointes (l'inverse du recouvrement maximum). Une représentation est visible pour chaque bloc nuageux à la figure (24). Le calcul du recouvrement aléatoire se fait de la même façon que pour le calcul d'une probabilité pour une union d'évènement :

$$C_{rand} = c_a + c_b - c_a c_b \quad (2)$$

D'un point de vue probabiliste, c_a (resp c_b) est la probabilité d'être sous le nuage a (resp b). C_{rand} est la probabilité de se trouver sous le nuage a ou le nuage b.

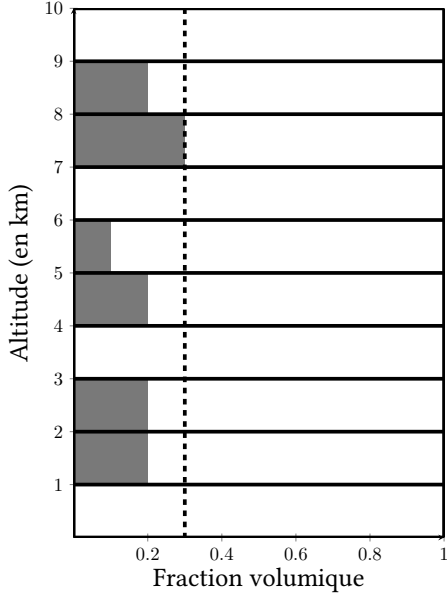


FIGURE 23 – Recouvrement maximum

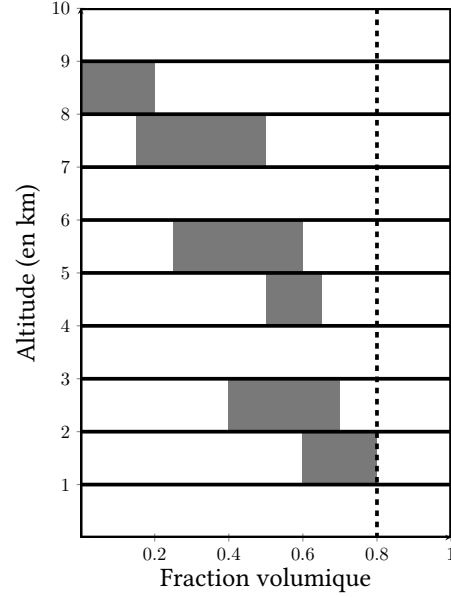


FIGURE 24 – Recouvrement aléatoire

A partir de ces définitions, Hogan définit un paramètre de recouvrement α pour calculer de manière plus générale le recouvrement entre deux couches. Il est alors défini par :

$$C = \alpha C_{max} + (1 - \alpha) C_{rand} \quad (3)$$

Le paramètre α est défini dans l'article par :

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\Delta z}{\Delta z_0}\right) \quad (4)$$

où Δz est l'écart d'altitude entre deux niveaux et Δz_0 est une longueur de décorrélation qui est choisie pour que le modèle soit en accord avec les données observées. Dans la section suivante, nous allons présenter une autre façon de déterminer α

2.3.2 Calcul du paramètre de recouvrement

Dans ce stage, le paramètre α est considéré comme constant par nuage. L'article à paraître de R. Lebrun et J.L. Dufresne [4] crée une méthode pour calculer ce facteur. Ils déterminent le paramètre α en supposant que la fraction nuageuse volumique est connue pour chaque niveau k , de même que la fraction surfacique du nuage. Ils partent du haut du nuage et descendent progressivement vers le bas en calculant à chaque fois la nouvelle fraction surfacique C grâce aux formules (1), (2) et (3). Cette fonction donne :

$$f : \begin{cases} [0, 1] & \longrightarrow & [0, 1] \\ \alpha & \longmapsto & \mathbb{P}_\emptyset(\alpha, \mathcal{N}, 1 - CF) \end{cases} \quad (5)$$

où \mathcal{N} est le nombre de colonnes verticales, CF la fraction volumique du nuage, \mathbb{P}_\emptyset est la probabilité d'avoir une colonne entièrement vide qui se calcule de proche en proche :

$$\mathbb{P}_\emptyset(\alpha, \mathcal{N}, CF) = (1 - CF_1) \prod_{k=2}^{\mathcal{N}} \left[\alpha \frac{1 - \max(CF_{k-1}, CF_k)}{1 - CF_{k-1}} + (1 - \alpha)(1 - CF_k) \right] \quad (6)$$

On a donc que :

$$CF_{surf} = f(\alpha) \quad (7)$$

Or la fonction f est strictement croissante donc injective. Pour trouver le α adapté, il faut alors faire une dichotomie pour arriver à approcher la formule (7). L'implémentation est assez simple et suit le schéma ci-dessous.

Entrées : Erreur ϵ acceptable pour le résultat et le nombre d'itération maximum it_{max}

- 1 Initialisation : $\alpha = 0.5$, $\alpha_{min} = 0$, $\alpha_{max} = 1$
- 2 **tant que** $|f(\alpha) - CF_{surf}| > \epsilon$ et que le nombre d'itération inférieur à it_{max} **faire**
- 3 **si** $f(\alpha) - CF_{surf} < 0$ **alors**
- 4 $\alpha_{min} = \alpha$
- 5 **fin**
- 6 **sinon**
- 7 $\alpha_{max} = \alpha$
- 8 **fin**
- 9 Actualisation de α comme le milieu des deux nouveaux extrêmes
- 10 **fin**

Sorties : α à ϵ près

Cet algorithme tourne très rapidement car il possède une complexité logarithmique. Il permet d'avoir les α de tous les nuages en une poignée de secondes.

2.3.3 Résultats

Nous allons maintenant étudier la distribution des α obtenues. La figure (25) permet de voir que pour les plus gros nuages, les α sont assez proches. Plus particulièrement, pour les dix plus gros nuages qui représentent 80% de la fraction surfacique totale, le paramètre varie entre 0.88 et 0.97, pour les 20 plus gros (95% de la fraction), il varie entre 0.80 et 0.98 et pour 99%, toutes les valeurs se trouvent entre 0.7 et 0.98. Cette figure permet aussi de voir que plus les nuages sont petits, plus le α a tendance à fluctuer. Enfin, elle montre que pour les plus petits nuages (les vingt derniers), ce paramètre est égal à 0 ou à 1. Ce résultat est logique car ces nuages sont généralement à quelques pixels. Donc soit ils sont alignés sur l'horizontal (une seule couche horizontale), dans ce cas pas de recouvrement donc $\alpha = 0$, soit ils sont alignés verticalement, le recouvrement est alors maximal et donc $\alpha = 1$.

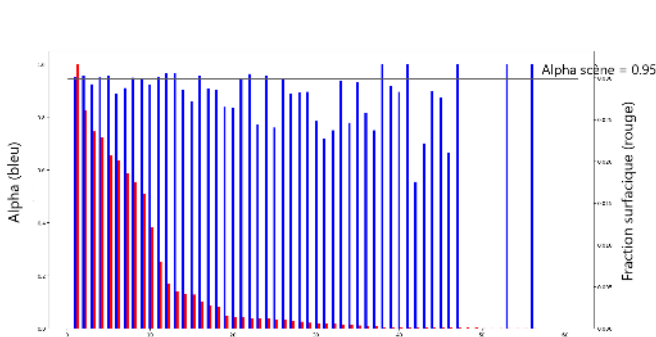


FIGURE 25 – Comparaison de α et de la fraction surfacique pour les nuages classés par ordre décroissant

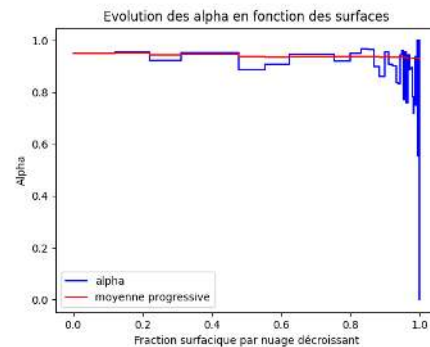
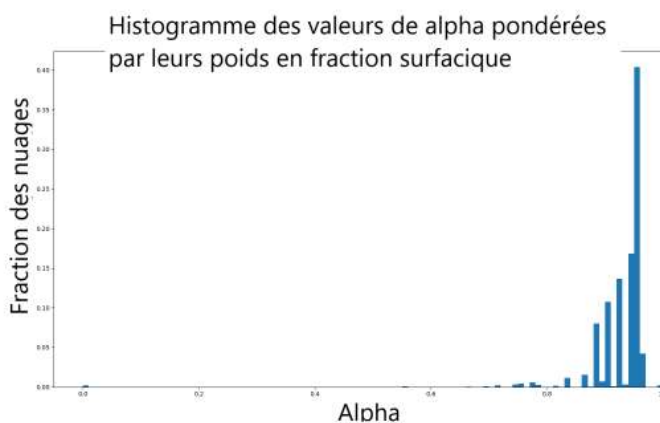
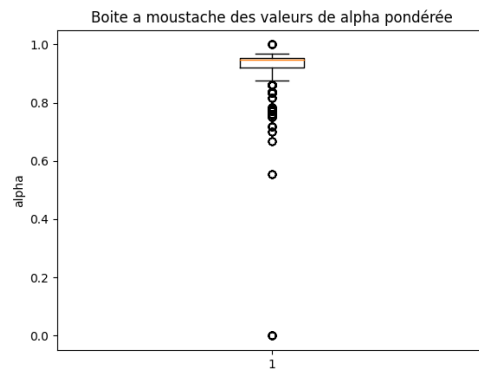


FIGURE 26 – Alpha comparé à leur moyenne progressive pondérée

La figure (26) est un double tracé. En abscisse est la fraction surfacique progressive. C'est à dire la fraction couverte par ce nuage et par tous les nuages plus gros que lui. L'apport

de chaque nuage est représenté par une ligne horizontale de largeur sa fraction surfacique et commençant après la somme de toutes les fractions surfaciques des nuages le précédant. En bleu est affiché la valeur de α pour chaque nuage et en rouge est affichée la moyenne progressive pondérée par la fraction de chaque nuage. Ce graphique montre que la moyenne pondérée est très peu fluctuante par rapport aux variations du α des nuages plus petits. Il reste à peu près constant égal à 0.93. La figure (86) en annexe montre la fluctuation plus en détail. Le α varie de 0.95 à 0.93 ce qui est très peu. Si l'on considère que toute la scène nuageuse n'est qu'un seul nuage, le α calculé est de 0.95. Soit assez proche du alpha moyen pondéré par la fraction surfacique. D'ailleurs les valeurs de α pour les plus gros nuages sont proche du 0.95, ce sont les petits nuages qui contribuent à faire baisser la moyenne (voir figure 86 en annexe)

Pour voir plus en détail les valeurs de α pondérées par leur poids en fraction surfacique, regardons les figures (27) et (28). Elles montrent bien que les α sont très concentrés entre 0.87 et 0.97 (figure (88 en annexe)).

FIGURE 27 – Histogramme des α FIGURE 28 – Boîte à moustache des α

Pour essayer de caractériser au mieux la répartition des alphas, un test de Shapiro a été mis en place. Ce test permet si la pvalue est suffisante de ne pas rejeter l'hypothèse que les α suivent une loi normale. Le test est rejeté pour les plus gros nuages rassemblant les 80%, 95% et 99% des nuages ainsi que un test sur tous les nuages. Donc cela revient à dire avec certitude que les α ne suivent pas une loi normale.

Pour la suite, nous considérerons que les α sont constants pour tous les nuages ou qu'ils suivent une distribution proche de celle observée. Pour ce qui est des formes de courbes (volumique, eau liquide) et des altitudes des sommets (voir des bases), il faudra tester toutes ces combinaisons lors de la reconstruction et voir quelle configuration apporte les meilleurs résultats.

2.4 Distribution horizontale du contenu en eau en fonction de la distance au bord

Regardons maintenant comment on peut répartir l'eau dans un niveau donné.

2.4.1 Quantité d'eau moyenne en fonction de la distance au bord

Pour commencer, nous allons regarder l'évolution de l'eau moyenne en fonction de la distance au bord pour une altitude z d'un nuage. C'est à dire que l'on calcul la moyenne en

eau de toutes les cellules nuageuses dont la distance au bord se trouve dans l'intervalle $[k dx, (k + 1)dx]$ pour k un entier et dx le coté du cube élémentaire. On observe des courbes qui ressemblent aux courbes (29) et (30). Ce sont les mêmes allures mais pas exactement les mêmes valeurs en eau (voir juste en dessous pourquoi). Dans ces figures, on voit que la quantité d'eau liquide moyenne est assez faible sur le bord comparé au reste du nuage. Mais l'on voit plus que cela. Sur beaucoup de nuages, on voit que il y a des paliers qui se forment à partir de distances un peu plus grande (généralement à partir de 50 à 75m). Ces paliers semblent montrer qu'une subdivision en deux parties a du sens. On veut maintenant voir si ces paliers peuvent s'aligner sur un nuage entier pour voir si l'on garde l'allure en deux zones. Pour cela, on va chercher à normaliser les paliers entre eux. La méthode choisie (de manière arbitraire) est de compenser le fait que l'eau moyenne soit plus grande en haut du nuage par la fraction volumique (qui est plus faible au sommet). Chaque cellule d'eau est alors normalisée de la façon suivante :

$$eau_{i,norm} = \frac{eau_i}{\sum eau_j} \frac{CF_{vol}}{CF}$$

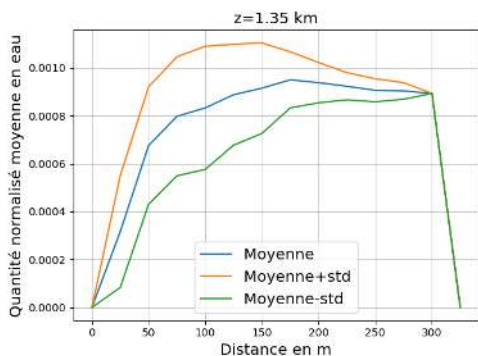


FIGURE 29 – Courbe en eau moyenne normalisée en fraction de la distance au bord pour le nuage 2 de la scène 10

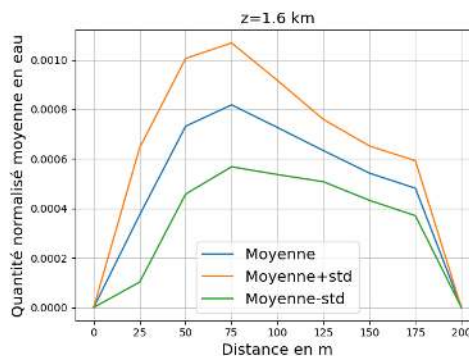


FIGURE 30 – Courbe en eau moyenne normalisée en fraction de la distance au bord pour le nuage 12 de la scène 9

Cette quantité d'eau normalisée est en suite moyennée par intervalle de distances au bord puis représentée (29) et (30). En comparant les tracés, il est possible de voir que le palier quand il est clairement visible possède des valeurs en eau assez proches pour tous les niveaux verticaux des nuages. Les figures (31) et (32) montrent bien l'effet de palier. Il y a une stabilisation pour le premier quartile jusqu'au troisième quartile. Mais des valeurs en quantité non négligeable restent assez loin de ce palier, bien que l'écart entre le premier décile et le neuvième diminue avec la distance. Pour cela il va falloir trouver une autre vision pour observer cette répartition de l'eau.

2.4.2 Répartition en décile

En supposant que la normalisation fonctionne bien, on va chercher à regarder la composition des déciles en eau en fonction de la distance au bord pour un nuage entier. La première vision que l'on cherche à voir est la répartition des déciles par rapport à la distance au bord.

La figure (33) montre cette répartition. La première observation est de voir la répartition des cellules en fonction de la distance au bord. On voit bien que la majorité des cellules se trouvent proches du bord et que leur nombre diminue avec la distance au bord. Ceci est dû à

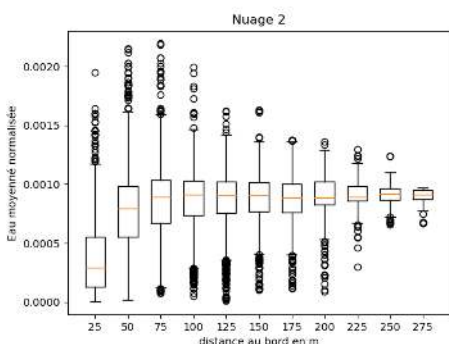


FIGURE 31 – Boite à moustache sur la moyenne en eau en fonction de la distance au bord pour le nuage 2 de la scène 10

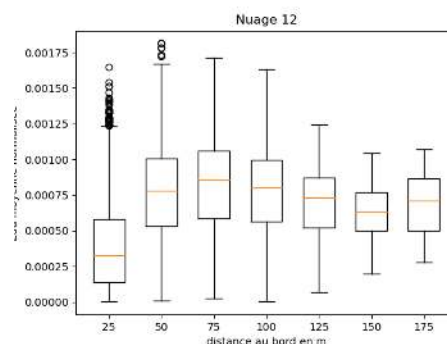


FIGURE 32 – Boite à moustache sur la moyenne en eau en fonction de la distance au bord pour le nuage 12 de la scène 9

des raisons purement géométrique. Ensuite on voit clairement que le premier décile se trouve presque exclusivement dans l'intervalle de distance le plus petit (25-50m). Le deuxième décile est aussi partout présent dans le premier intervalle de distance, mais il est encore encore présent dans le deuxième intervalle de distance (50-75m) mais très faiblement. Pour le troisième au sixième décile, on observe encore cette tendance mais avec un rééquilibrage entre les deux premières distances. Enfin pour les derniers déciles cette tendance semble s'inverser. On a constaté que quasiment tous les nuages étudiés ont une distribution semblable. Donc on se dit que le résultat pourrait être généralisé. Pour y voir plus clair, traçons la même figure mais normalisée pour ne plus être influencé par le nombre de cellule à une distance du bord (variable d'un nuage à l'autre).

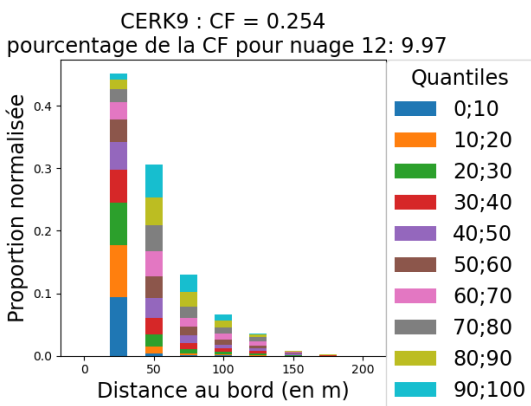


FIGURE 33 – Répartition des déciles dans la distance au bord

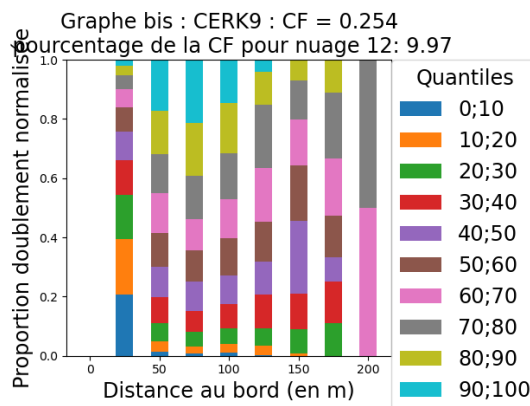


FIGURE 34 – Répartition des déciles dans la distance au bord normalisé

La figure (34) montre bien ce que l'on présageait sur les premiers déciles (jusqu'au 5ème). On retrouve des proportions un peu similaires pour les autres nuages (de la même scène ou non). Pour les autres déciles la caractérisation est plus complexe. Les figures (35) et (36) ainsi que celles dans la partie B.2 en annexe (figures 95 à 102) montrent bien qu'on peut faire une caractérisation pour les premiers déciles mais que les derniers sont plus complexes à appréhender.

Pour une éventuelle reconstruction en utilisant ces données, on pourrait fixer les pre-

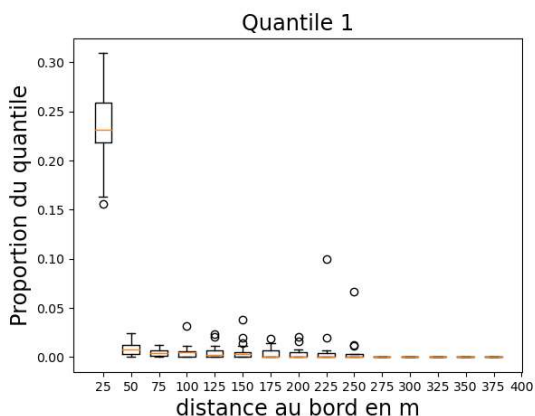


FIGURE 35 – Répartition du premier décile en eau liquide dans la distance au bord

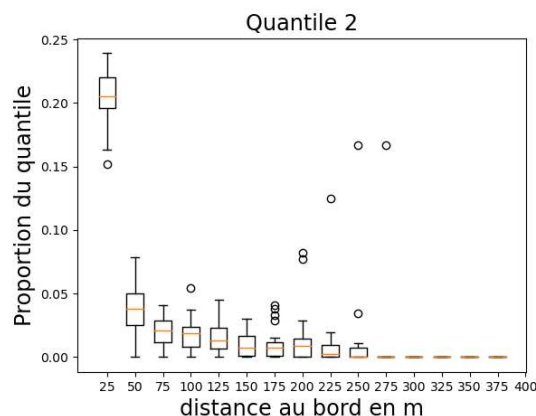


FIGURE 36 – Répartition du deuxième décile dans la distance au bord

miers déciles en fonction de la distance au bord. Et pour les derniers, de les répartir de façon aléatoire. Regardons maintenant un autre point de vue avec la répartition des distance au bord en fonction des déciles (l'inverse de ce que l'on voyait précédemment).

En analysant ces répartitions, on a pu vérifier que les courbes de nuages différent ont des profils semblables. Un exemple de ces courbes se trouve dans la figure (37). On y voit que la proportion des cellules à 25m du bord sont décroissant avec la distance. On a bien que les cellules dont le contenu en eau est plus faible se trouvent proche du bord. Lorsque l'on regarde sans les 25m (2ème figure), on voit des proportions plutôt équilibré dans les déciles pour les premières distances autres (ici 50-75m et 75-100m). Pour les distances plus lointaine, on ne peut pas vraiment faire de généralité car elles ne sont pas toujours présentes pour des petits nuages.

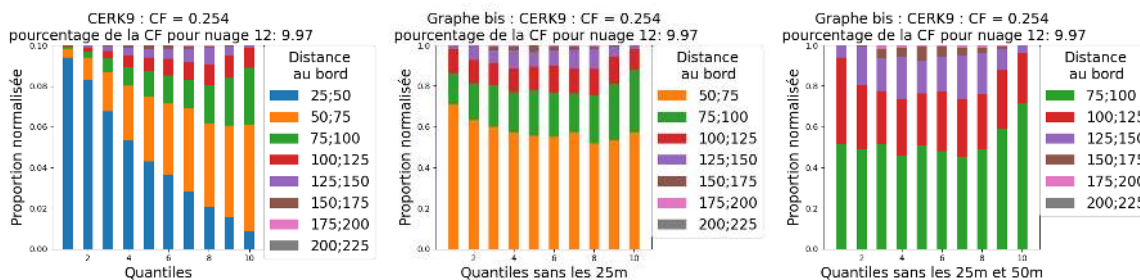


FIGURE 37 – Répartition de la distance au bord pour les différents déciles

En généralisant ces calculs pour l'ensemble des nuages des scènes, on obtient les boites à moustache ci dessous (figure 38 ainsi que la figure 103). Pour les trois premiers groupes de distances, on observe qu'il y a une tendance. Les écarts inter-déciles sont assez faibles. On peut alors les utiliser pour une reconstruction. Par exemple, il est possible de dire comment on réparti l'eau dans les premières couches de distance au bord. Les couches plus lointaine ont des plus grand écart inter-déciles et sont donc plus difficile à représenter.

Globalement on voit que les valeurs en eau sont plus faible sur le bord qu'au centre du nuage. Cela s'explique par le fait que dans l'environnement voisin au bord, l'air est plus sec et se mélange au bord du nuage, donc l'eau est diluée par rapport au centre du nuage.

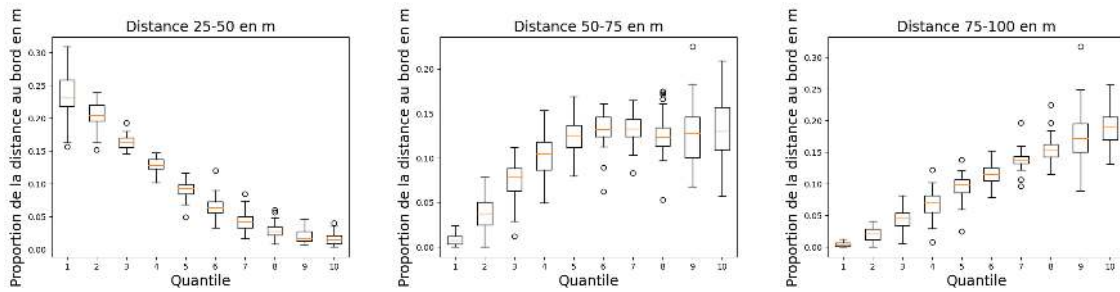


FIGURE 38 – Répartition des distances au bord dans les déciles

Avec toutes ces informations, il est possible de faire une nouvelle répartition type pour la reconstruction. Ces choix peuvent être fait grâce aux boîtes à moustaches. Il faudrait après qu'ils soient validés par une simulation radiative. Mais avec des répartition comme celles ci les résultats devraient être meilleure qu'avec la répartition en eau en deux partie (comme pour l'article Tripleclouds [7]).

3 Reconstruction de scène nuageuse

Dans cette partie, je vais expliquer la méthode que j'ai choisi pour reconstruire une scène nuageuse. Le but étant de créer une scène réaliste et donc d'avoir des nuages variés. Je vais d'abord expliquer la création d'un nuage à partir de données type. Puis je vais montrer des reconstructions.

3.1 Reconstruction d'un nuage

3.1.1 Informations disponibles

Comme expliqué précédemment, notre objectif est de reconstruire une scène nuageuse réaliste du point de vue du calcul radiatif à partir d'un nombre réduit de variables qui sont calculées par un modèle atmosphérique. Les variables sont typiquement la fraction surfacique totale couverte par les nuages de la scène, les profils verticaux de fraction volumique et du contenu en eau liquide associé. Il faut donc notamment se fixer une manière d'agencer les couches ensemble afin que la distribution verticale de la fraction nuageuse surfacique vue de l'espace reconstruite soit proche de celle de référence. La partie la plus importante lors de ce guidage sera donc la fraction surfacique que l'on ajoute à chaque niveau par rapport à ce que l'on avait déjà créé précédemment. Cette donnée ne provient pas directement du modèle atmosphérique mais pourra être calculé à partir de la fraction surfacique totale via l'estimation de l'initialisation du paramètre de recouvrement α (cf section 2.3). Ici nous supposons que ce profil vertical est connu et prenons celui que l'on peut calculer à partir des résultats de la simulation LES. Dans cette reconstruction, nous avons fait le choix de partir du sommet du nuage et de construire progressivement, niveau par niveau, jusqu'à la base du nuage. Le guidage revient donc à suivre la courbe de la figure (40) pour le nuage couche par couche ou la figure (39) pour l'ensemble de la scène nuageuse. Il est clair que si la reconstruction suit ces courbes parfaitement, que ce soit pour chacun des nuages ou pour la scène globale, la fraction surfacique sera conservée. Elles peuvent être reconstruite à partir du facteur de recouvrement α

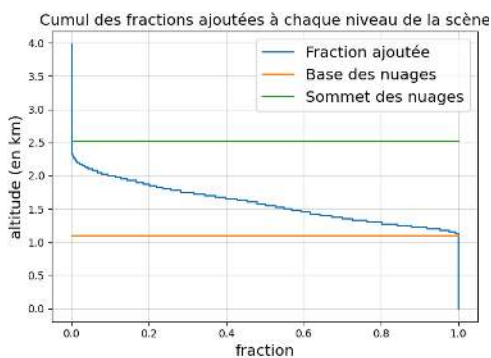


FIGURE 39 – Fraction surfacique ajoutée accumulée de la scène nuageuse

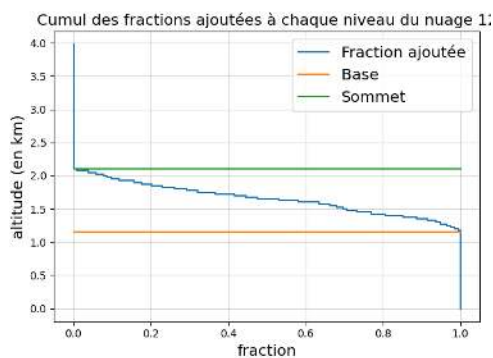


FIGURE 40 – Fraction surfacique ajoutée accumulée d'un nuage (n°12)

3.1.2 Construction d'un nuage

Pour construire un nuage, il faut connaître son profil en fraction volumique par niveau (cf figure 5), et la quantité d'eau de chaque niveau (cf figure 7). Enfin, dans cette sous partie, la courbe de fraction surfacique ajoutée à chaque niveau est supposée connue. Comme dit

précédemment, on va construire le nuage en partant du sommet et en descendant niveau par niveau.

Dans un premier temps, nous allons construire la forme d'une couche du nuage. Tout du long de cette construction, nous allons raisonner par discrétisation de la scène en maille élémentaire de taille égale à celle de la LES, soit 25m de côté. Donc nous allons choisir le nombre de maille à remplir pour chaque niveau, et leur organisation. L'idée retenue a été de prendre des formes les plus compactes que possible. On a choisi de chercher à s'approcher d'un cercle. On calcule un rayon équivalent en considérant que son nombre de cellule fait un cercle avec la formule : $r = dx \sqrt{\frac{n}{\pi}}$, avec n le nombre de cellule à placer sur le niveau et r le rayon et dx la longueur horizontale de chaque maille. On choisit un centre pour cette forme, on place un point, puis on construit un carré qui entoure ce point, puis un autre carré jusqu'à ce qu'on ait atteint $\lfloor \frac{\sqrt{2}}{2} r \rfloor$ nombre de carrés créés. En effet on est sûr que le cercle que l'on cherche à construire englobera tous ces carrés, donc autant les créer d'un coup. En faisant cela sauve du temps de calcul car on a pas de vérification à faire sur la distance au centre d'un nouveau point à ajouter. Puis on crée les carrés suivants et on ajoute les points qui sont à une distance inférieure à $r + 1$.

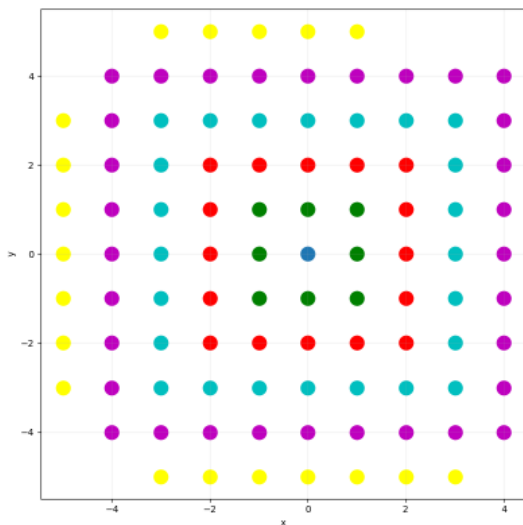


FIGURE 41 – Niveau vertical possédant 100 cellules

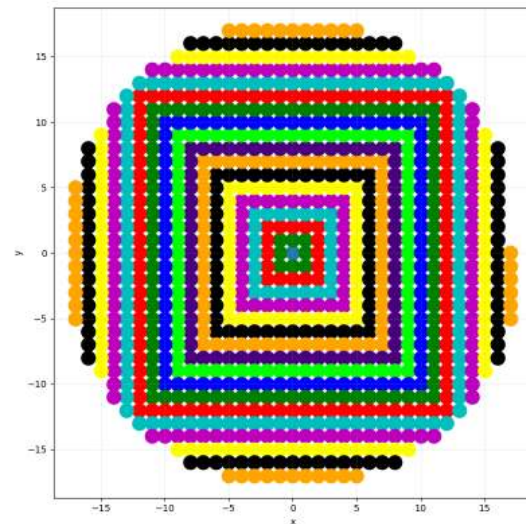


FIGURE 42 – Niveau possédant 1000 cellules

Les affichages ci-dessus montrent comment s'agencent les différentes couches. La dernière couche (non complétée totalement) est remplie coté par coté de manière aléatoire (uniforme). C'est ce que l'on voit dans la figure (41) ou les côtés gauche et bas ont été tirés en premiers puis le coté haut. Mais le coté droit n'a pas été tiré. Cela permet d'enlever une direction privilégiée dans le code et donc d'avoir des nuages différents dans la forme.

Si ce n'est pas la première couche, il faut dorénavant l'assembler dans le nuage déjà créée. L'objectif étant de mettre la nouvelle couche de telle manière à ce que la nouvelle fraction surfacique soit proche de celle correspondant au niveau vertical dans le nuage original(cf figure 40). Une première idée pour répondre à cette problématique est de déplacer le centre du "cercle" horizontalement sous toutes les mailles de la dernière couche fixée au nuage déjà créée. Mais cette partie est très coûteuse en temps. Il a donc fallu trouver une autre manière de procéder.

La méthode retenue pour cette reconstruction est une technique de dichotomie répétée pour trouver le point où l'on place le centre de la nouvelle couche. Le but de cette technique est de choisir une droite sur laquelle s'appliquera un algorithme de dichotomie pour trouver le point où le centre sera placé ce qui permettra de s'approcher au plus de la fraction surfacique à ajouter. Puis, ce principe sera réutilisé sur d'autres droites pour s'approcher de plus en plus de l'objectif sans avoir un temps de calcul trop coûteux.

Plus précisément cette technique se décompose en plusieurs étapes. La première est de choisir un nombre de dichotomie à réaliser. Notons ce chiffre n . Pour parcourir un maximum de configurations différentes, on va tirer n angles de manières aléatoires dans les intervalles $\left[\frac{k\pi}{n}, \frac{(k+1)\pi}{n}\right]$ pour k allant de 0 à $n-1$. La figure (43) permet de voir un exemple de tirage pour $n = 4$. Ensuite à partir de l'angle, on crée la droite qui va nous servir pour la dichotomie, composée de points (en coordonnées entières). on choisit de la faire traverser la couche précédente en passant par son centre. Et de la faire dépasser de deux fois le rayon r de part et d'autre. Cela est illustré sur la figure (44). La dichotomie consiste à regarder ce que serait la nouvelle fraction surfacique si le centre du nouveau niveau se trouvait aux extrémités de la droite. On calcul alors la nouvelle fraction surfacique et on conserve le bout qui avec l'ajout d'un cercle en son centre est la plus proche de la courbe des fractions surfaciques progressives (cf figure 40). Pour l'autre, on prend la moitié de la droite (en un point entier bien sur) et on y place la nouvelle extrémité. Puis on réitère le procédé jusqu'à ce que les deux extrémités soient voisines sur la droite. On garde alors la meilleure des deux restants et on calcule l'erreur entre la courbe de fraction surfacique progressive et la nouvelle fraction (si on plaçait le cercle au point trouvé). On la compare ensuite avec les erreurs des itérations précédentes (des autres droites) et on conserve ou non ce centre. Si par contre au cours des itérations on trouve un point qui approche très fortement la fraction surfacique progressive, par exemple un écart d'un ou deux pixels, alors on considère que le point trouvé est correct et on place le cercle au centre trouvé par la dichotomie. Ce principe permet d'économiser un peu de temps de calcul. Quoiqu'il arrive, cet algorithme prend une fin assez rapidement. Les étapes sont résumées dans l'algorithme ci-dessous :

- Entrées :** Nuage construit du sommet à l'altitude $z + 1$
- 1 Choix de n : nombre maximal de dichotomie
 - 2 $\epsilon = +\infty$ où ϵ erreur entre la nouvelle fraction surfacique cumulée et la valeur cible
 - 3 **tant que** ϵ est trop grand et que toutes les droites n'ont pas été tirées **faire**
 - 4 | Choix d'un cadran parmi ceux non tiré aléatoirement
 - 5 | Tirage d'un angle dans ce cadran
 - 6 | Création de la droite
 - 7 | Dichotomie
 - 8 | Comparaison de l'erreur et mise à jour de ϵ
 - 9 **fin**
 - 10 Ajout du nouveau niveau à l'altitude z .
- Sorties :** Nuage construit du sommet à l'altitude z

L'utilisation de cette dichotomie ne repose pas sur des bases théorique. En effet, rien ne permet de dire si la fonction à minimiser (celle qui à un point renvoie la nouvelle fraction surfacique progressive avec le centre du nouveau cercle placé en ce point) est monotone. Cependant après des tests, on constate qu'elle produit une erreur généralement assez faible (de l'ordre de 5%).

Lorsque l'on regarde les erreurs de fraction surfacique pour des nuages recrées pour un nombre de dichotomie différente, on s'aperçoit qu'elles finissent par être quasi constantes

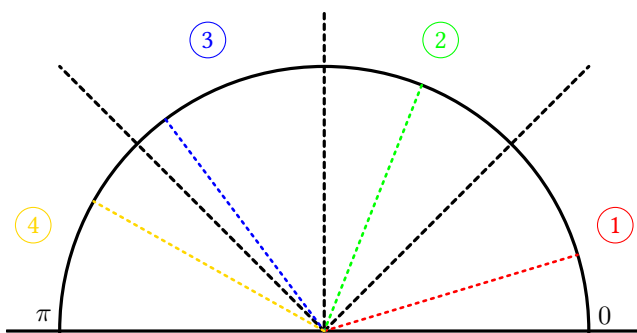


FIGURE 43 – Tirage de droite

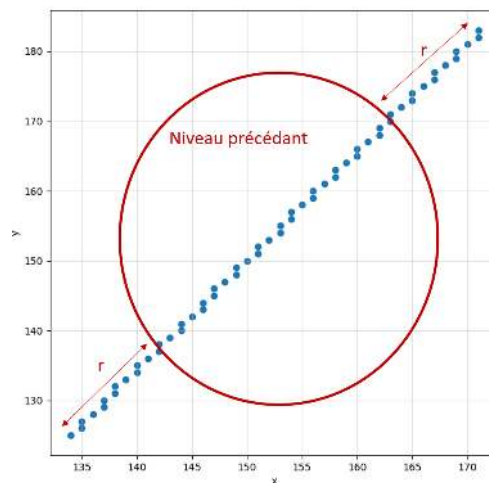


FIGURE 44 – Exemple de droite pour la dichotomie

à partir de la 10^{ème} itération. Donc pour la suite, nous allons choisir 10 comme nombre de droites tirées par niveau. Pour ce qui est de l'erreur tolérée à chaque niveau ϵ , on a choisi de la fixer à un écart de deux pixels. On a fixé très basse car finalement le temps de faire les 10 itérations n'est pas trop coûteux. Recréer une scène peut prendre quelques minutes ce qui n'est pas gênant car cette opération n'est à faire qu'une fois et que le traitement radiatif est lui beaucoup plus long.

Enfin lorsque que l'on a décidé de l'emplacement du nouveau niveau, il faut choisir comment l'on répartit l'eau destinée à ce niveau. Pour cela on crée un masque avec des 0 là où il n'y a pas de nuage et une proportion d'eau (entre 0 et 1) là où il y a le nuage. Il faut que la somme de tous les éléments de ce masque vaille 1. Puis, dans l'hypothèse où l'eau liquide est réparti de façon homogène par niveau, on multiplie ce masque par la quantité d'eau totale du nuage d'origine à ce niveau. On verra plus tard d'autres méthodes de répartition de l'eau liquide horizontalement.

Dans toute cette construction, on cherche à s'éloigner au plus d'une direction préférentielle pour la création de nuage. Cela devait permettre de créer des nuages différents pour se rapprocher de la pluralité de la scène observée. Mais des études [1] montrent que le recouvrement peut dépendre du vent. Donc on pourrait biaiser cet algorithme en favorisant les directions de dichotomie pour avoir des nuages en biais et d'orientation commune.

3.1.3 Résultat de cette reconstruction

En implémentant ce qui est expliqué dans la sous partie 3.1.2 et en remplissant chaque niveau de manière homogène en eau liquide, on obtient les figures (45) et (47) qui correspondent à la recréation du nuage 12 déjà illustré plus haut à plusieurs reprises.

Comme attendu le nuage reconstruit est bien plus compact et régulier que l'original (figure 46). Pour ce qui est de sa construction, l'empilement de cercle est bien visible. La fraction volumique et la quantité d'eau par niveau sont complètement conservées. Et la fraction surfacique progressive est elle très proche de la courbe originale. C'est donc rassurant. Le temps de calcul est faible (15 secondes) ce qui est aussi positif pour la suite.

Des simulations radiatives sont en cours pour déterminer l'impact de la forme 3D du nuage reconstruit face à celle du nuage original. Mais ce qui nous intéresse vraiment, c'est

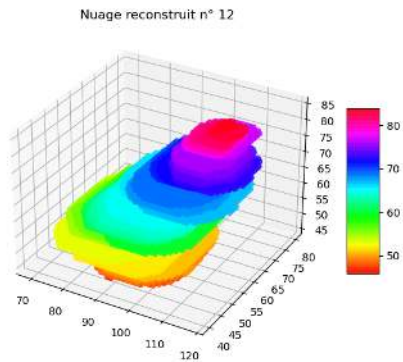


FIGURE 45 – Représentation 3D d'un nuage reconstruit

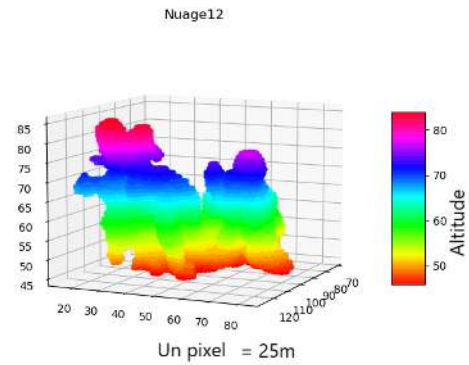


FIGURE 46 – Nuage original

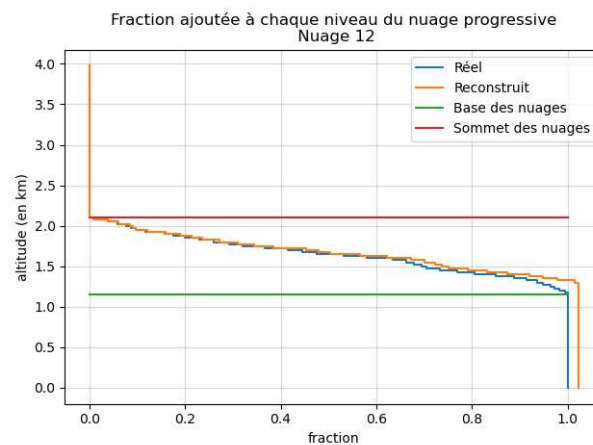


FIGURE 47 – Comparaison de la fraction progressive reconstruite

l'impact à grande échelle que peut avoir une telle reconstruction. Car les modèles de climat sont dans des dimensions beaucoup plus grande qu'un seul nuage (à minima de la taille des simulations hautes résolutions analysées ici).

Maintenant que le processus de reconstruction d'un nuage a été fixé, on va chercher à l'appliquer pour faire une reconstruction de scène nuageuse entière.

3.1.4 Séparation de l'eau en deux zones

Lors de la reconstruction, nous allons adapter la partie 2.4 avec seulement deux quantiles pour la répartition en eau liquide. Ce choix suit un article publié en 2007 par Shonk et Hogan [3] qui veulent créer un modèle d'hétérogénéité de l'eau dans les nuages. Cet article propose de séparer la tranche des nuages en 2 parties égales : le centre et le bord. En s'inspirant de ce qu'ils font on va choisir de mettre 16% de la quantité d'eau sur les bords et 84% au centre. Dans la reconstruction, on va couper le cercle en 2 (voir figure 48). Pour cela on utilise le fait qu'on construit le cercle en partant du centre et en allant progressivement jusqu'au bord. La partie centrale sera composée de la première moitié des cellules du cercle. Le résultat montre que la partie centrale n'est pas cercle mais un carré.

Cette légère amélioration nous amène à chercher à affiner la répartition en eau dans les niveaux.

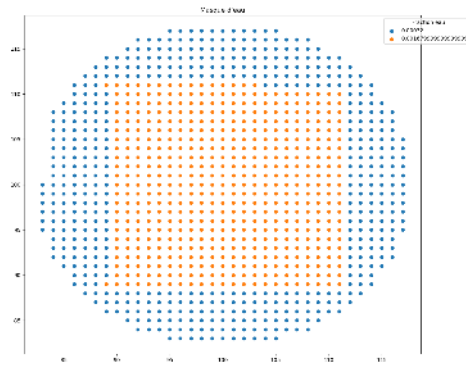


FIGURE 48 – Division du cercle

3.2 Reconstruction de la scène initiale

Le but de cette sous partie est de montrer comment recréer une scène nuageuse précise en récréant un à un les différents nuages à partir de leurs profils individuels. Cela va permettre d’avoir un autre aperçu du réalisme ou non des nuages recrées.

3.2.1 Construction

La reconstruction d’une scène déjà existante suit le schéma suivant. Pour chaque nuage, on commence par générer, à partir des informations de toute la scène originale, la fraction volumique, la fraction surfacique ajoutée progressive, et la répartition de l’eau en fonction de l’altitude. Avec cela, il est possible de créer chacun des nuages en suivant la méthode présentée en 3.1.2. Il reste ensuite à le positionner horizontalement à l’intérieur de la maille, c’est à dire à l’intérieur de la scène nuageuse. La couche du sommet a pour centre lors de sa construction le milieu de la scène nuageuse (l’algorithme le place arbitrairement là). Il faut donc le déplacer. Mais avant cela il faut un point d’arrivée. Un choix possible est de prendre un barycentre. Le problème est que plusieurs sont à disposition. Le premier est le plus naturel puisqu’il s’agit du barycentre de toutes les cellules du nuage. Mais puisque que l’on cherche ses coordonnées horizontales, il est possible de considérer que l’on cherche un barycentre de la surface du nuage vue du dessous (surface en 2D). Enfin, il est aussi possible de travailler sur le barycentre de toutes les cellules pondérées par leur poids en eau. Au final, comme il est possible de le voir dans la figure (49), ces trois points sont très proches. Comme le déplacement des nuages sera en deux dimensions, le barycentre retenu est celui de la surface vue du dessous. Une fois le nuage déplacé au barycentre, le nuage est marqué avec son numéro originel et le tout est ajouté au différent masque (eau et cellules nuageuses).

3.2.2 Comparaison radiative de cette scène avec l’originale

Lorsqu’on applique le procédé décrit dans la partie 3.2.1, on obtient la figure (50). La première figure représente la scène originale avec les quantité d’eau liquide par niveau homogénéisée, la seconde la scène reconstruite et la dernière une reconstruction avec tous les cercles centrés, pour reproduire l’hypothèse de recouvrement maximum (cf section 2.3.1). Les gros amas d’eau liquide sont conservés par la reconstruction mais ils sont plus denses. C’est logique car l’algorithme remplace les formes variées de chaque niveau par des cercles. Bien que l’on ait l’impression d’une surface nuageuse reconstruite plus faible, ce n’est pas le cas car la fraction surfacique reconstruite est de 0.253708 contre 0.254364. Soit une erreur

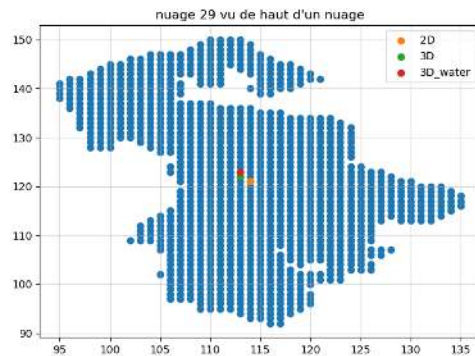


FIGURE 49 – Exemple de barycentres pour un nuage

relative de 0,26%. Donc de ce point de vue la scène est bien reconstruite. Les figures (91) et (92) (voir les annexes) montrent que les nuages sont bien reconstruits aux bons endroits. De plus la forme des nuages reconstruit est assez proche des originales ce qui nuance l'impression précédente. Les figures (93) et (92) en annexe montrent que la taille des nuages est bien reconstruite et que l'ordre des nuages est quasiment respecté. Pour ce qui est du respect des contraintes physiques, la quantité d'eau par niveau est totalement conservée. La fraction volumique est quant à elle quasiment conservée : la courbe réelle et reconstruite se confondent à l'oeil nu (voir figure (89) dans les annexes). La différence s'explique par le fait que certains nuages se superposent lors de la reconstruction alors que les nuages précédant ne se touchait pas. Mais cela reste très marginal au vu de la différence entre les deux courbes. Enfin la fraction surfacique ajoutée (figure 90 dans les annexes) à chaque niveau est assez proche de la courbe issue de la scène originale.

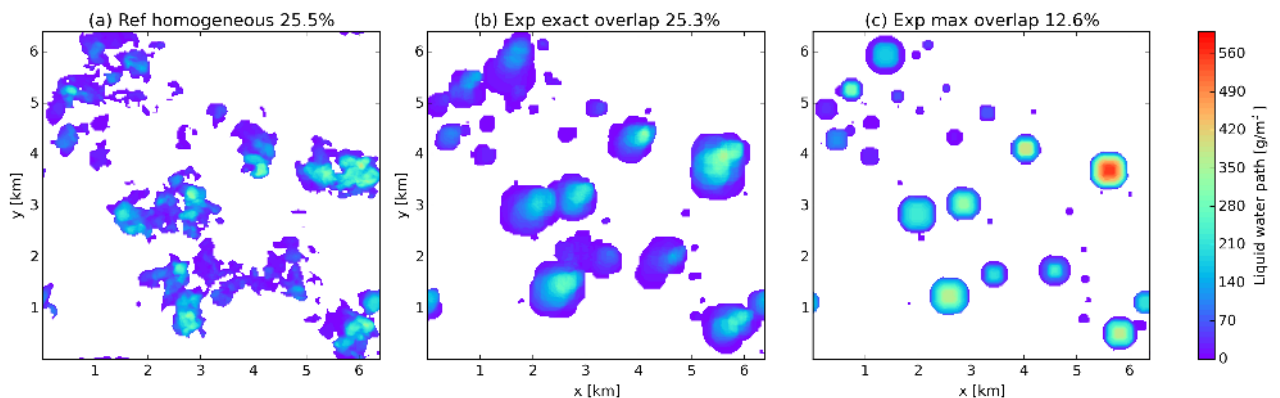


FIGURE 50 – Scène reconstruite homogène en eau liquide par niveau

L'écart d'un point de vue radiatif entre la scène originale et la scène avec un alignement parfait (overlap maximum) est de l'ordre de -18.4 Wm^{-2} ce qui est très grand. Beaucoup plus que ceux entre la vraie reconstruction et l'originale : 2.37 Wm^{-2} . Cela veut donc dire que le recouvrement à bel et bien un impact radiatif. Donc ce résultat est très encourageant pour la suite.

Regardons maintenant les résultats pour une reconstruction en deux partie de l'eau pour chaque couche (cf partie 3.1.4).

On applique ce raisonnement qui change la répartition horizontale de l'eau liquide dans la reconstruction d'une scène sortie de la LES. La figure (51) permet de voir les trois scènes que

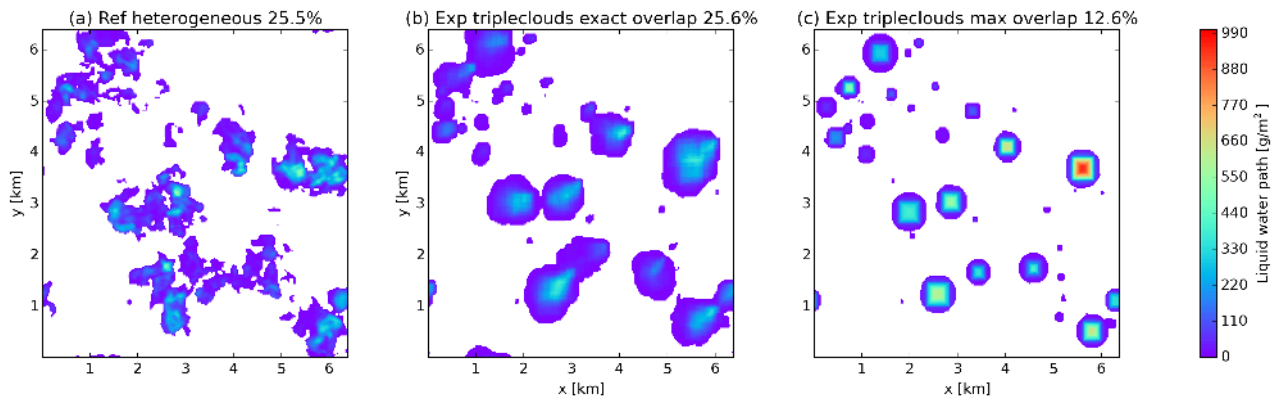


FIGURE 51 – Scène reconstruite hétérogène en eau liquide par niveau

l'on va comparer par des simulations radiatives. Comme précédemment, celle de gauche est la scène originale hétérogène, la seconde est la scène hétérogène reconstruite et la dernière est la scène reconstruite avec des cercles hétérogènes empilées (recouvrement maximum). Comme pour la reconstruction de scène homogène, on voit que la forme implique de gros écarts. Mais on note aussi une diminution de l'erreur entre la scène reconstruite et l'originale. Mais celle-ci n'est pas très forte. On capture partiellement l'effet de l'hétérogénéité.

3.3 Reconstruction de N nuages identiques

On a vu un premier effet de la reconstruction à partir des positions exactes des nuages provenant de la LES qui a permis de valider le modèle des "cercles" et du recouvrement. Mais on a utilisé beaucoup d'informations comme les courbes de fraction volumique et de contenu en eau liquide vertical pour chaque nuage. On va essayer de faire une première reconstruction en supprimant les profils précédant pour chaque nuage.

3.3.1 Construction

La première idée de reconstruction possible est de créer une scène comportant un nombre fixé de nuages identiques (ou presque) avec une répartition en eau homogène par niveau. C'est à dire que chaque cellule d'un même niveau dans un nuage aura la même quantité d'eau. Dans la suite, on va considérer que l'on crée N nuages.

Pour créer les nuages, il faut donner à l'algorithme (décrit dans la sous-partie 3.1) les informations nécessaires. Pour ce qui est de la quantité d'eau par niveau, on divise la courbe de la scène globale en N parts égales. Pour la fraction volumique par niveau (en nombre entier dans le code), on divise celle de la scène en N parties, $N - 1$ égales (division entière par N) et le reste pour le dernier nuage. Pour la fraction surfacique progressive, on met un N -ème de la courbe globale (figure 39) dans le premier nuage. Puis on crée le premier nuage. On enlève alors la fraction surfacique progressive créée par ce nuage et on l'enlève à la courbe totale. Puis, on prend le un $N - 1$ -ème de la courbe restante. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus de nuage à créer. Cela permet de corriger les erreurs en fraction surfacique progressive pour la scène entière.

Maintenant que les nuages sont créés, il faut les placer pour qu'ils ne se recouvrent pas trop. En effet, lors de la création des nuages, les informations sont données pour des nuages ne se superposant pas. Pour cela, on va diviser la scène en petit carré de taille égale pour

qu'il n'y ait pas de recouvrement. On découpe la scène en le plus petit carré supérieur au nombre de nuages à créer N . Par exemple pour $N = 5$, on va découper la scène en 9 (le côté sera divisé en 3) ou pour $N = 10$, on va découper la scène en 16 (cf figure 52). Cela permet d'avoir le nombre minimum de carré de tailles égales pour placer le nombre N de nuages. Puis lorsque on crée un nuage on tire aléatoirement la case ou mettre le nuage. Un exemple de reconstruction se trouve dans la figure (53).

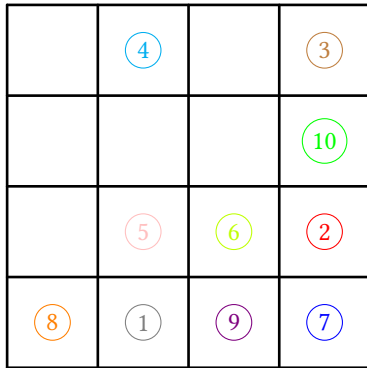


FIGURE 52 – Répartition des nuages similaires dans le plan

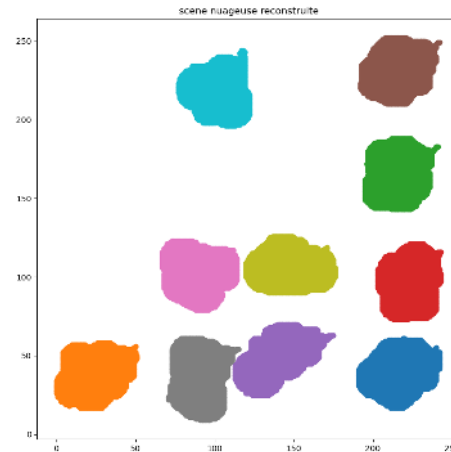


FIGURE 53 – Exemple de reconstruction avec 10 nuages de même taille

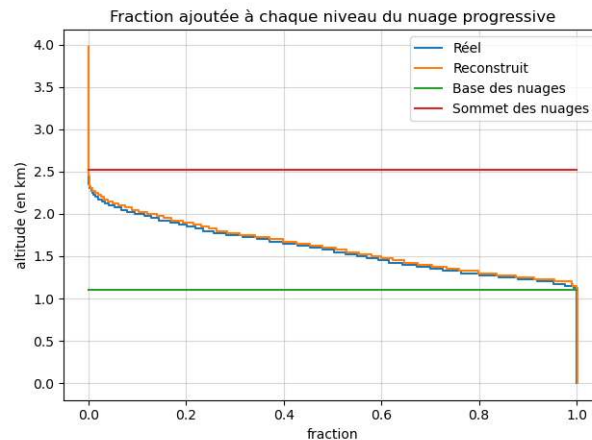


FIGURE 54 – Exemple de reconstruction avec 10 nuages de même taille

Cette création de 10 nuages a pris 218s. La reconstruction conserve parfaitement la quantité d'eau par niveau ce qui était attendu par la création de l'algorithme. L'algorithme conserve aussi la fraction volumique donnée pour chaque nuage parce que les nuages ne se superposent jamais. Enfin la fraction surfacique finale est de 0.25436401 contre 0.25390625 dans la scène originale dans laquelle nous avons extrait les informations. La fraction surfacique est alors bien reconstruite.

Pour analyser les erreurs que l'on commet, on va recréer 50 fois des scènes à un nombre de nuage fixé et faire une analyse des écarts normalisés. Les résultats sont dans le tableau (1). On voit que la reconstruction s'approche très bien de la fraction surfacique. Le biais moyen est de l'ordre du demi pourcent. On voit aussi que il y a une tendance surestimer la fraction surfacique. C'est un premier biais non voulu dans l'algorithme que l'on ne sait pas

expliquer. Enfin, un test de Shapiro sur ces erreurs nous dit qu'elles peuvent suivre une loi normale.

Nombre de nuage	10	20	30	40	60
Moyenne	0.00579	0.00253	0.00372	0.00326	0.00372
Ecart-type	0.00762	0.00590	0.00635	0.00617	0.00583

TABLE 1 – Résultat des écarts normalisés de reconstructions de scène

3.3.2 Comparaison radiative de cette scène avec l'originale

Des résultats d'une reconstruction de 60 nuages (nombre de nuage de la scène originale) sont visible sur la figure (55). La simulation radiative de cette scène ne donne pas un écart avec l'originale beaucoup plus grand que pour la reconstruction précédente. C'est plutôt bon signe. Mais les photons ont été envoyés du zénith. Généralement, les écarts s'agrandissent lorsque le soleil s'approche de l'horizon où d'autres processus rentrent en compte. Donc il faut regarder cette faible augmentation de l'erreur avec précaution.

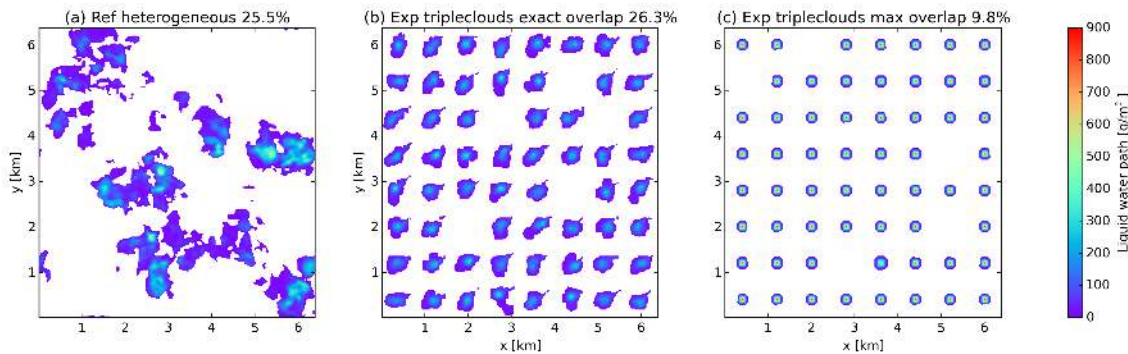


FIGURE 55 – Recréation d'une scène à 60 nuages

3.4 Procédé pour reconstruire une scène

Maintenant que nous avons fait ces reconstructions, essayons de décrire un schéma type pour une reconstruction statistique précise avec uniquement les informations disponibles en sortie du modèle de climat.

La première chose à faire est de tirer aléatoirement le nombre de nuages et de leurs tailles. Cet aspect n'a pas été étudié pendant le stage. Pour les bases, comme nous avons vu qu'elles sont presque toutes à la même hauteur, il suffit de voir sur le modèle de climat l'altitude minimum de la courbe de fraction volumique. Pour les épaisseurs, on tire des altitudes de sommet avec au moins un sommet touchant le sommet de la courbe générale provenant du modèle. Une fois que l'on a les extremums des nuages, on tire la forme de la courbe de fraction volumique. On choisit l'option avec des populations de pics car beaucoup de nos observations reposent dessus. Grâce à cela, on a pour chaque nuage les courbes de fraction volumique. Pour ce qui est de la répartition en eau, si on choisit de suivre les pistes précédentes, il faut remplir dans chaque couche en regardant la distance au bord. L'eau sera attribué pour chaque nuage en fonction de sa taille en cellules et de son altitude. Il ne manque plus que la courbe de fraction surfacique ajoutée pour appliquer notre algorithme

de construction de nuage. En fait cette courbe est calculable en fonction du α (paramètre de recouvrement). En effet ce paramètre est lié au recouvrement entre deux couches successives, donc à la nouvelle fraction que l'on ajoute entre chaque couche. On a alors la courbe manquante au puzzle. On peut maintenant reconstruire tous les nuages.

Le dernier problème reste l'agencement de tous ces nuages. Cette question n'a pas encore fait l'objet de beaucoup de recherche. Pour le moment, on plaçait les nuages de manière à ce qu'il ne se touche pas. Mais ce choix pourrait bien se montrer très limité. Plusieurs pistes sont alors possibles pour affiner le résultat. La première serait de placer aléatoirement les nuages sur la carte mais cela aurait tendance à recouvrir des nuages entre eux et donc à perdre en fraction surfacique. La deuxième serait d'étudier les distances moyenne avec le nuage le plus proche. Puis de placer les nuages aléatoirement à cette distance ou dans une distance tiré sans qu'il touche un autre nuage. Il faudrait tester les deux méthodes avec des simulations radiatives pour voir laquelle serait la mieux.

Conclusion

Ce stage avait pour but d'analyser des simulations à haute résolution (LES) développer des méthodes permettant de reconstruire statistiquement la distribution horizontale des propriétés nuageuses de leurs valeurs moyennées horizontalement telles que celles disponibles en sortie du modèle de climat. Cette reconstruction est importante en vue de faire des simulations plus précises sur le bilan radiatif. En analysant des LES, j'ai pu tirer des informations qui m'ont permis fabriquer un premier algorithme. Les versions recrées sont pour l'instant très simplistes mais ont permis de voir de premiers résultats pour des formes en 3D dans le cadre du projet. Plus tard, l'algorithme utilisé sera perfectionné dans le but de coller au mieux aux observations que ce soit en répartition d'eau ou en forme 3D et donc de créer des scènes nuageuses plus réalistes à partir de peu d'informations. Si tout évolue bien, la version future de ce code sera utilisé pour des simulations par Monte-Carlo du bilan radiatif terrestre et non plus d'une petite portion de l'atmosphère.

Plus personnellement, travailler sur un sujet qui vise à quantifier l'impact du réchauffement climatique par un bilan radiatif a été très stimulant. De plus j'ai pu découvrir plus en détail les nuages, que ce soit de leurs formes et caractéristiques ou de leur cycle de vie. Ce stage m'a aussi permis de remettre en pratique et développer mes connaissances dans le langage python. Même si toutes les études réalisés ou certaines reconstructions n'ont pas abouti, les résultats obtenus ont permis à l'équipe avec qui je travaillais de progresser dans leurs recherches. Enfin, ce stage m'a permis de découvrir avec plaisir le monde de la recherche. Cela a été possible car ce laboratoire possédait une ambiance à la fois intellectuellement stimulante et amicale.

Glossaire

- **Fraction surfacique (surface cloud fraction)** : Proportion de colonnes nuageuse
- **Fraction surfacique progressive (progressive surface cloud fraction)** : Cumul des fractions surfaciques que l'on ajoute pour chaque altitude en partant du haut du nuage. Par exemple elle vaut 0 lorsque l'on se trouve en haut du nuage et la fraction du nuage lorsque l'on se trouve à sa base. Généralement on utilise la version normalisée de cette courbe (1 à la base du nuage).
- **Fraction volumique (volume ratio)** : Proportion des mailles qui sont nuageuses à une altitude donnée.
- **LES (Large Eddy Simulations)** : Simulation des Large Eddy Models qui sont des modèles de mécanique des fluides conçus pour la simulation d'écoulements turbulents particulièrement adapté pour les études de la couche limite dans l'atmosphère.
- **Recouvrement de nuage (cloud overlap)** : Agencement entre deux niveaux nuageux successif adjacent. α est un paramètre qui le caractérise.
- **Simulation radiative par Monte-Carlo (radiative simulation)** : Suivre de photons virtuels depuis le soleil et à travers une scène nuageuse pour mesurer le flux radiatif en surface ou au sommet de l'atmosphère.

Références

- [1] Francesca Di Giuseppe and Adrian M Tompkins. A parameterization of cloud overlap as a function of wind shear and its impact in ecmwf forecast. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015.
- [2] Robin J. Hogan and Anthony J. Illingworth. Deriving cloud overlap statistics from radar. *Q. J. R Meteorol Soc.*, 2000.
- [3] Robin J. Hogan and Jonathan K. P. Shonk. Tripleclouds : An efficient method for representing horizontal cloud inhomogeneity in 1d radiation schemes by using three regions at each height.
- [4] Raphaël Lebrun and Jean-Louis Dufresne. A consistent representation of cloud overlap and cloud 1 sub-grid vertical heterogeneity. *à paraître*.
- [5] Theresa Mieslinger, Ákos Horváth, Stefan A. Buehler, and Mirjana Sakradzija. The Dependence of Shallow Cumulus Macrophysical Properties on Large-Scale Meteorology as Observed in ASTER Imagery. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124(21) :11477–11505, November 2019.
- [6] Petri Raisanen, Howard W. Barker, Marat F.Khairoutdinov, Li Jiangnan, and David A.Randall. Stochastic generation of subgrid-scale cloudy columns for large-scale models. pages 2047–2067, 2004.
- [7] Jonathan K. P. Shonk and Robin J. Hogan. Tripleclouds : An Efficient Method for Representing Horizontal Cloud Inhomogeneity in 1D Radiation Schemes by Using Three Regions at Each Height. *Journal of Climate*, 21(11) :2352–2370, June 2008.
- [8] Najda Villefranque. Effets radiatifs 3D des nuages de couche limite. *Thèse*, 2019.

Annexes

A Illustration de la scène nuageuse

A.1 Nuages en 3D

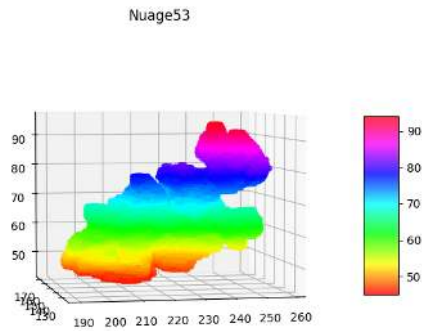


FIGURE 56 – Nuage 53 : plus gros nuage

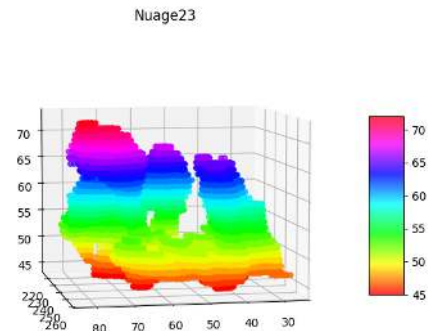


FIGURE 57 – Nuage 23 : 3eme plus gros nuage

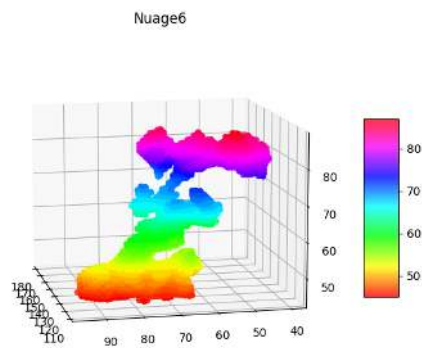


FIGURE 58 – Nuage 6 : 6eme plus gros nuage

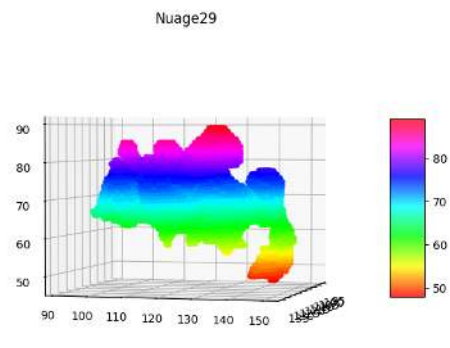


FIGURE 59 – Nuage 29 : 8eme plus gros nuage

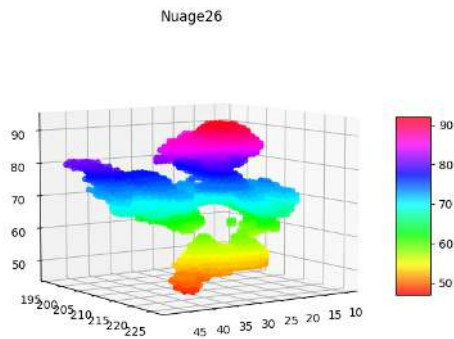


FIGURE 60 – Nuage 26 : 10eme plus gros nuage

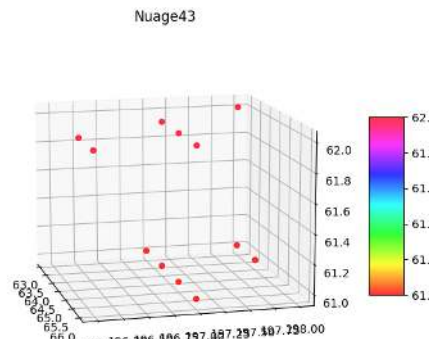


FIGURE 61 – Nuage 43 : 46eme plus gros nuage

A.2 Profils de fraction volumique

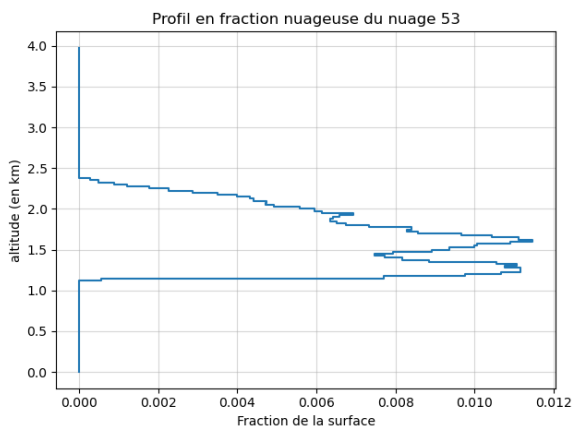


FIGURE 62 – Nuage 53 : plus gros nuage

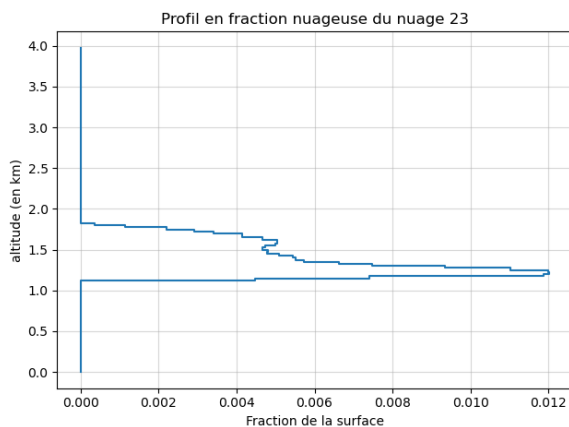


FIGURE 63 – Nuage 23 : 3eme plus gros nuage

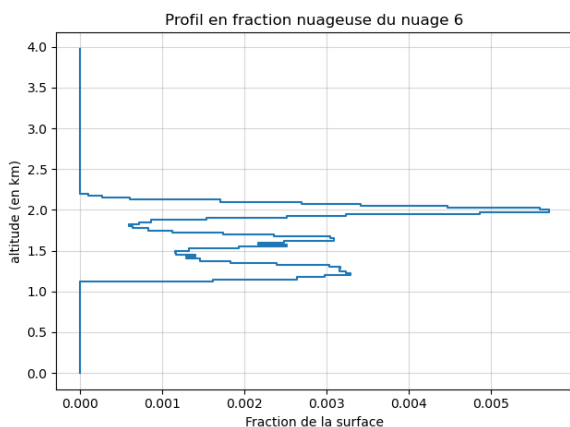


FIGURE 64 – Nuage 6 : 6eme plus gros nuage

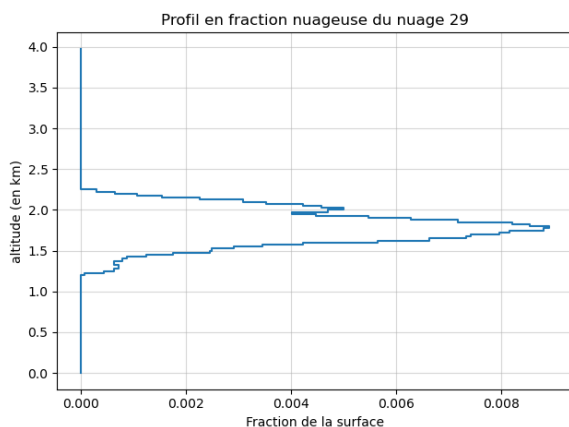


FIGURE 65 – Nuage 29 : 8eme plus gros nuage

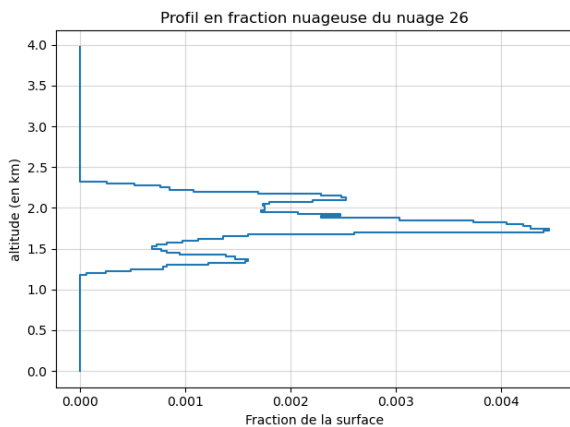


FIGURE 66 – Nuage 26 : 10eme plus gros nuage

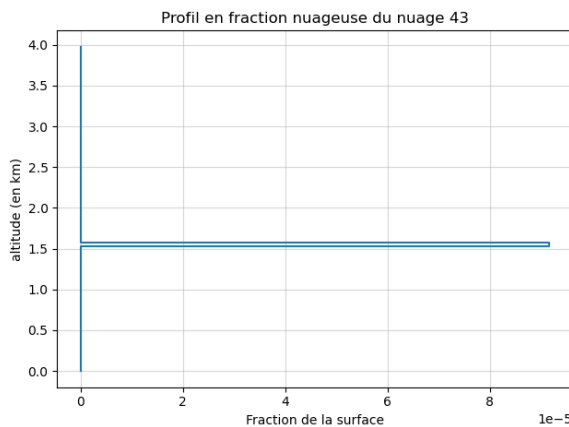


FIGURE 67 – Nuage 43 : 46eme plus gros nuage

A.3 Graphes d'eau liquide

A.3.1 Profils d'eau liquide par niveau

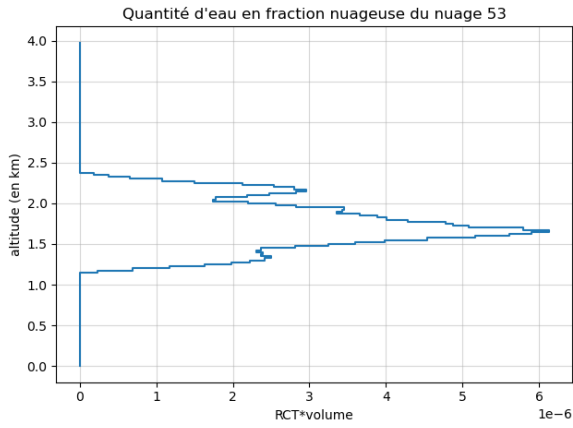


FIGURE 68 – Nuage 53 : plus gros nuage

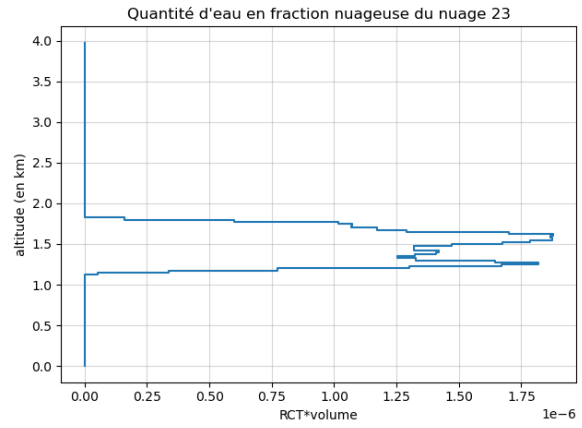


FIGURE 69 – Nuage 23 : 3eme plus gros nuage

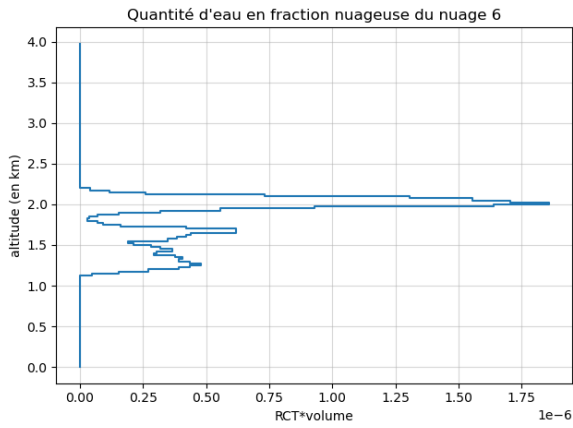


FIGURE 70 – Nuage 6 : 6eme plus gros nuage

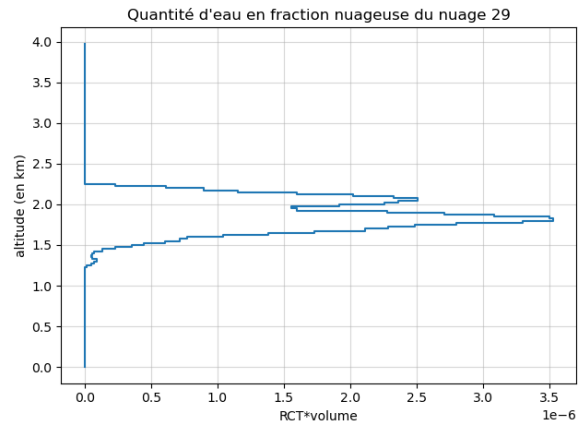


FIGURE 71 – Nuage 29 : 8eme plus gros nuage

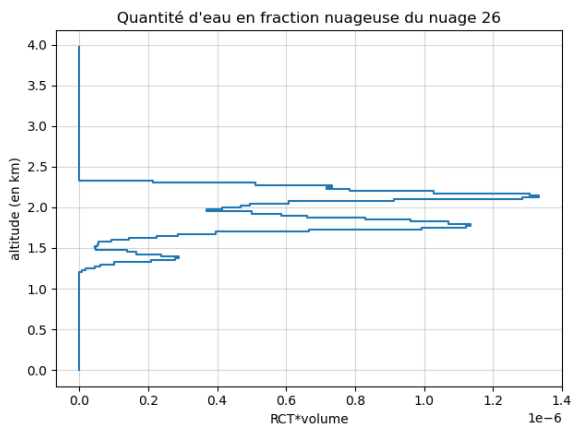


FIGURE 72 – Nuage 26 : 10eme plus gros nuage

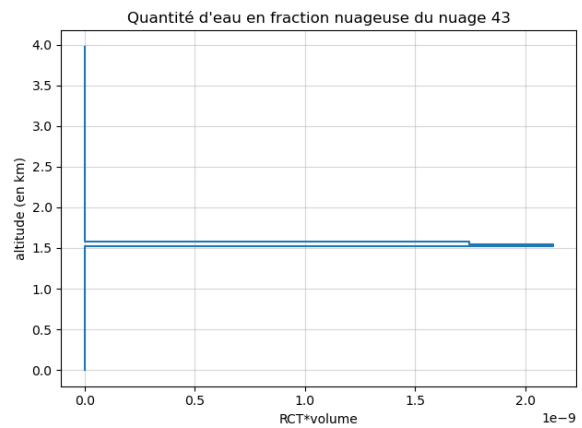


FIGURE 73 – Nuage 43 : 46eme plus gros nuage

A.3.2 Profils d'eau liquide moyenne par niveau

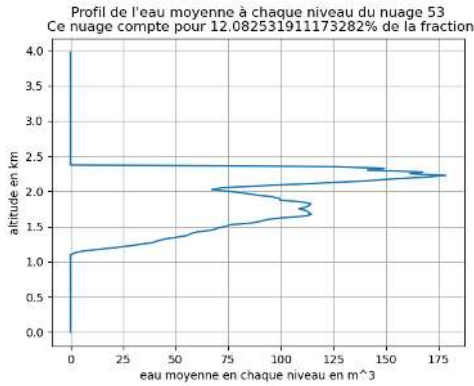


FIGURE 74 – Nuage 53 : plus gros nuage

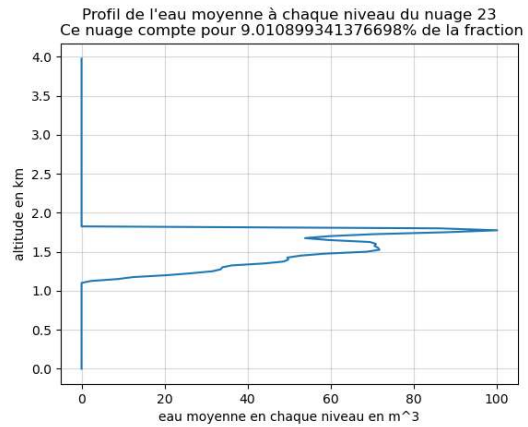


FIGURE 75 – Nuage 23 : 3eme plus gros nuage

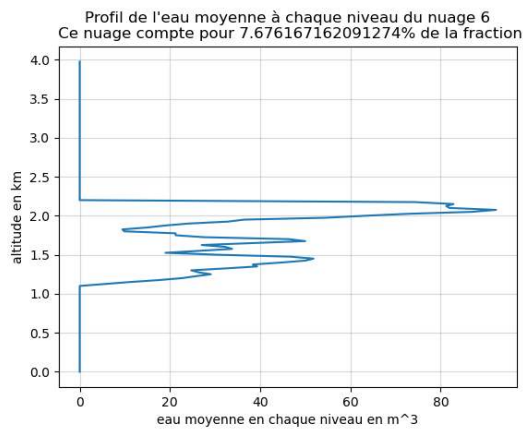


FIGURE 76 – Nuage 6 : 6eme plus gros nuage

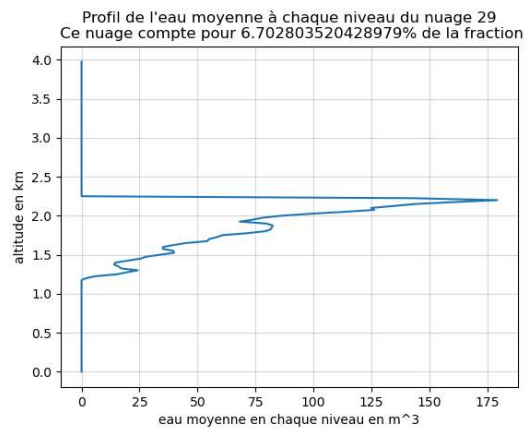


FIGURE 77 – Nuage 29 : 8eme plus gros nuage

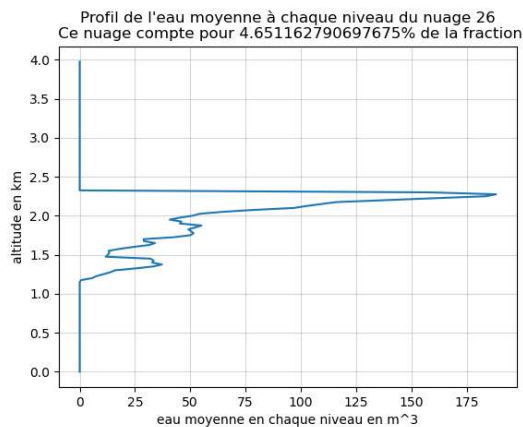


FIGURE 78 – Nuage 26 : 10eme plus gros nuage

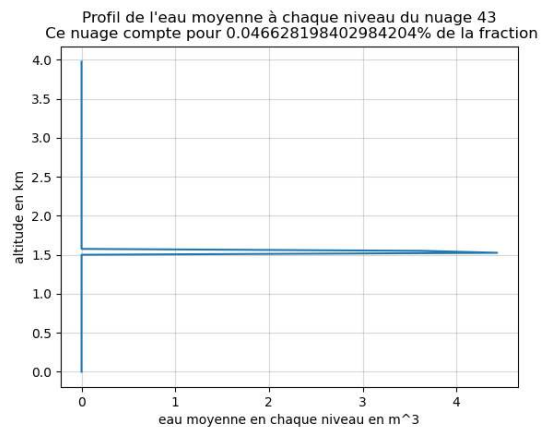


FIGURE 79 – Nuage 43 : 46eme plus gros nuage

A.4 Base et sommet

A.4.1 Base par rapport à un pourcentage de la fraction surfacique

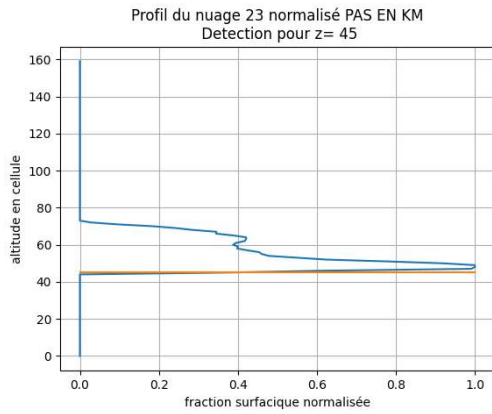


FIGURE 80 – Base nuage 23 en profil

Détection a z= 45 pour 37.22998729351969% de la fraction
Début à 45 pour 37.22998729351969 % de la fraction

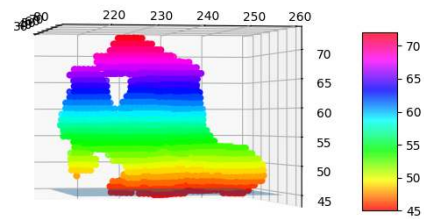


FIGURE 81 – Base nuage 23 en 3D

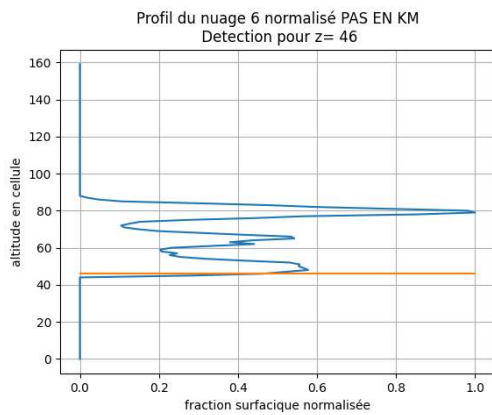


FIGURE 82 – Base nuage 6 en profil

Détection a z= 46 pour 46.25668449197861% de la fraction
Début à 45 pour 28.342245989304814 % de la fraction

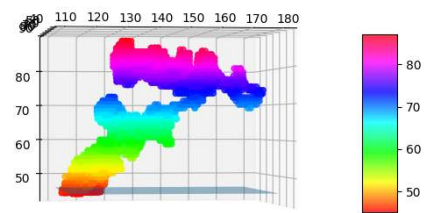


FIGURE 83 – Base nuage 6 en 3D

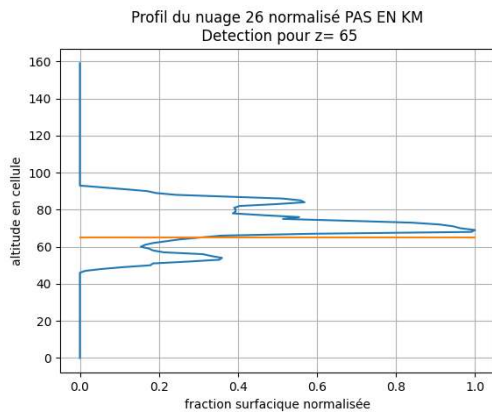


FIGURE 84 – Base nuage 26 en profil

Détection a z= 65 pour 30.47945205479452% de la fraction
Début à 47 pour 1.36986301369863 % de la fraction

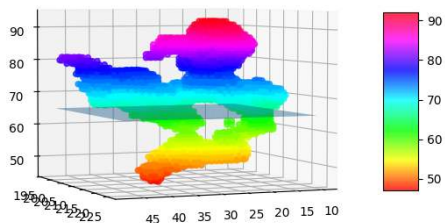


FIGURE 85 – Base du nuage 26 en 3D (raté)

A.5 Alpha

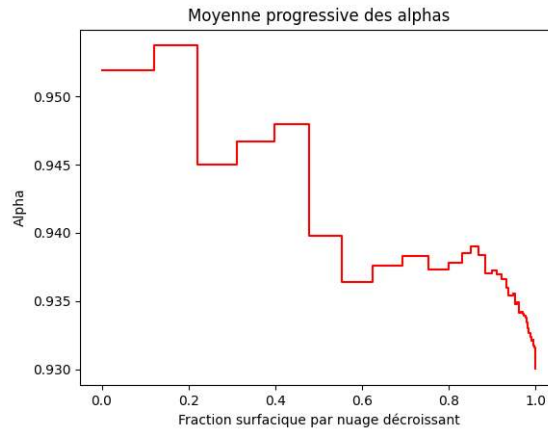
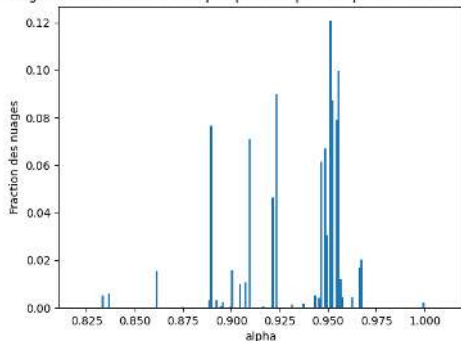


FIGURE 86 – Moyenne pondérée progressive des alpha

Histogramme des valeurs de alpha pondéré par leur poids en fraction de nuage



Boite à moustache des valeurs de alpha pondérée

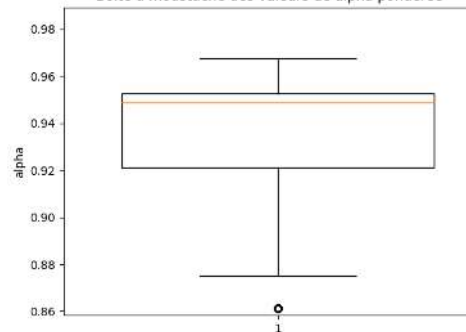


FIGURE 87 – Histogramme zoomé des alphas pondérés

FIGURE 88 – Boite à moustache des alphas pondérés

B Reconstruction

B.1 Reconstruction d'une scène déjà existante

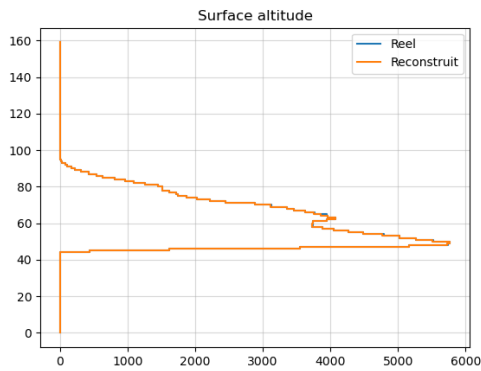


FIGURE 89 – Fraction volumique de la scène reconstruite comparé à la réelle

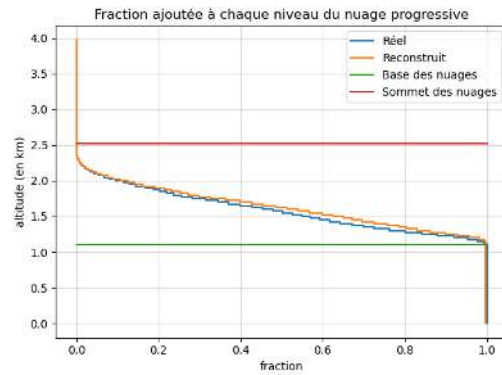


FIGURE 90 – Fraction surfacique progressive de la scène reconstruite

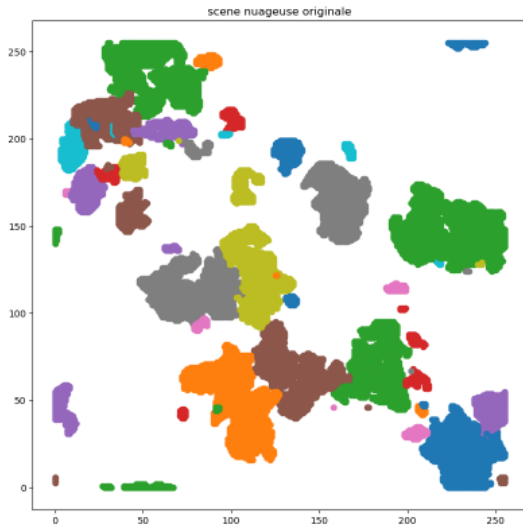


FIGURE 91 – Vision 2D compressée de la scène originale

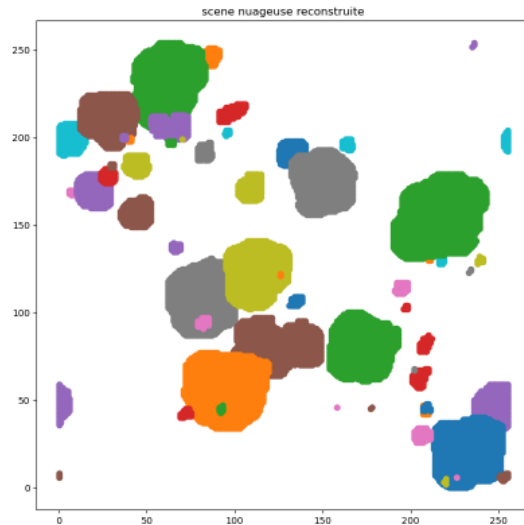


FIGURE 92 – Vision 2D compressée de la scène reconstruite

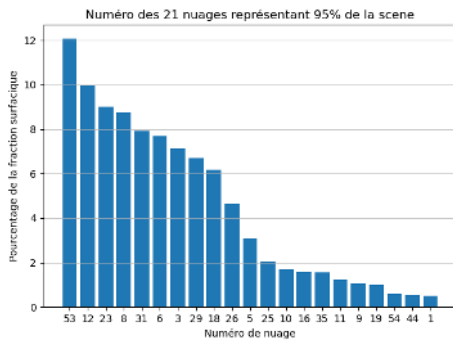


FIGURE 93 – Proportion des plus gros nuages en fraction surfacique de la scène originale

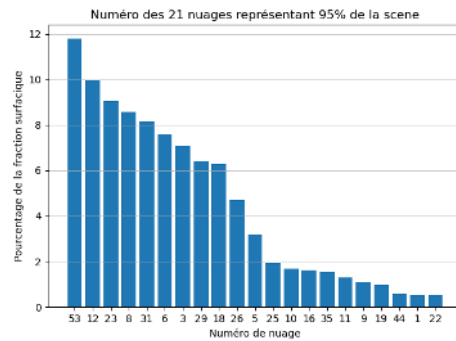


FIGURE 94 – Proportion des plus gros nuages en fraction surfacique de la scène originale

B.2 Boîte à moustache des déciles

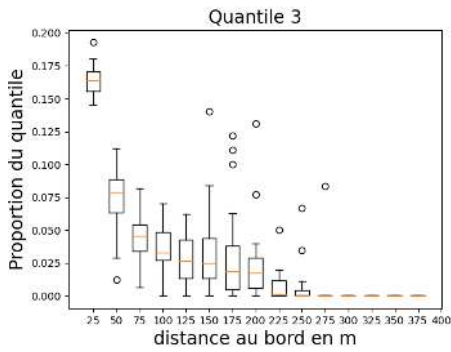


FIGURE 95 – troisième décile

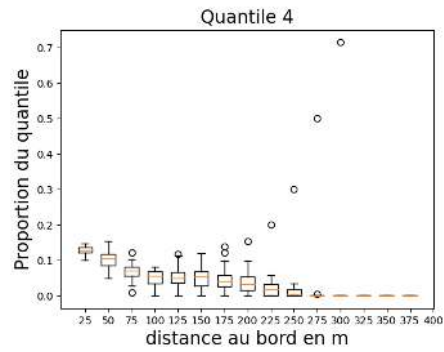


FIGURE 96 – quatrième décile

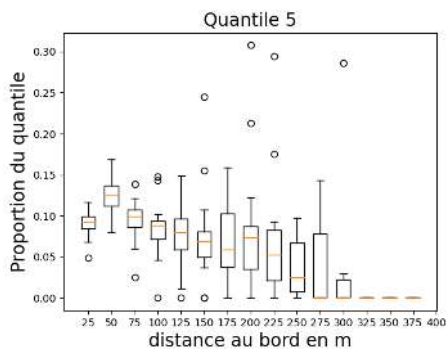


FIGURE 97 – cinquième décile

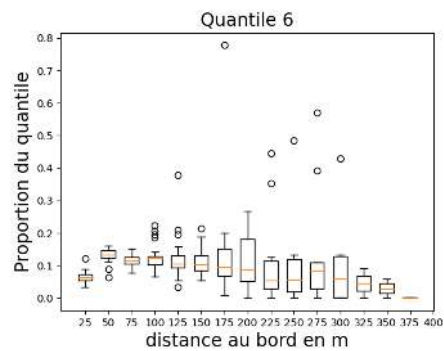


FIGURE 98 – 6ème décile

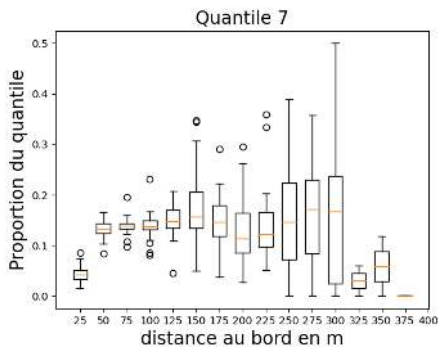


FIGURE 99 – 7eme décile

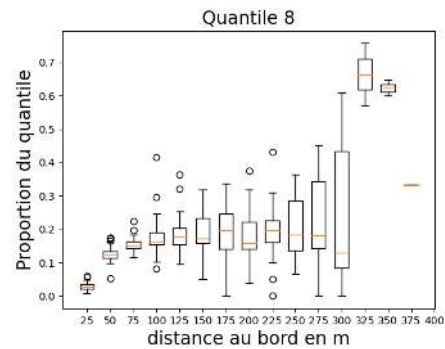


FIGURE 100 – 8ème quantile

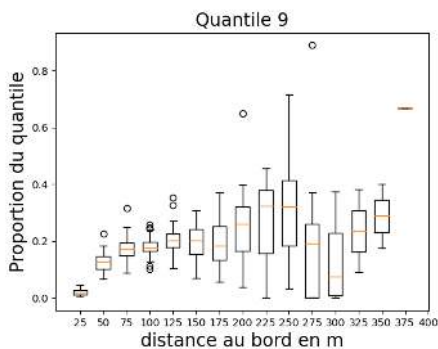


FIGURE 101 – 9eme décile

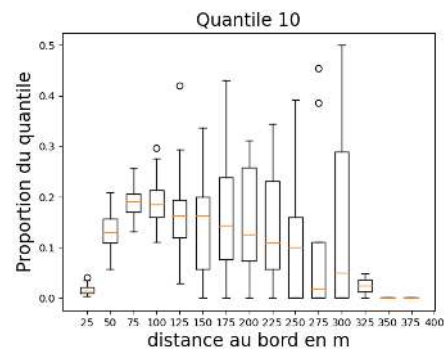


FIGURE 102 – 10ème quantile

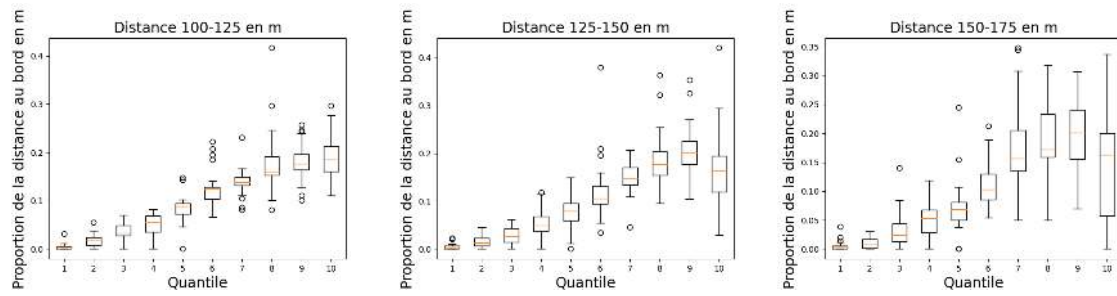


FIGURE 103 – Répartition des distances au bord dans les déciles