

Cas d'étude et outils numériques

2.1 La campagne de mesure NAWDEX

2.1.1 Présentation et objectifs

Les rôles joués par les processus diabatiques et convectifs dans le développement des cyclones extra-tropicaux ainsi que leurs interactions avec la dynamique de grande échelle restent encore aujourd'hui très discutés (chapitre 1). C'est pour mieux comprendre ces processus et donc, *in fine*, améliorer les modèles de prévision que la campagne de mesure NAWDEX (*North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment*) a été organisée. Celle-ci s'est déroulée entre le 17 septembre et le 22 octobre 2016 au-dessus de l'Atlantique nord (Schäfler *et al.*, 2018). Durant cette période, une dizaine de cyclones extra-tropicaux s'y sont produits. En se rapprochant de l'Europe de l'Ouest, la majorité d'entre eux ont été déviés vers les hautes latitudes par un anticyclone positionné au-dessus de la Scandinavie. Ce régime de blocage scandinave a dominé la situation synoptique depuis le début du mois de septembre avant de s'affaiblir vers le 25 septembre (courbe bleue dans Fig. 2.1a) lors de l'apparition d'une oscillation nord atlantique en phase positive (courbe rouge dans Fig. 2.1a). Le blocage scandinave s'est renforcé le 5 octobre, puis s'est maintenu jusqu'à la fin de la campagne de mesure. Une succession de trois cyclones extra-tropicaux (baptisés « *Walpurga* », « *Stalactite cyclone* » et « *Second cyclone* » selon Schäfler *et al.* (2018)) est suspectée d'être à l'origine de la constitution du blocage scandinave et de son maintien. Cette période de transition du régime de temps, entre le 25 septembre et le 5 octobre, est corrélée avec une perte de prévisibilité de la hauteur du géopotential de la moyenne troposphère en Atlantique nord dans le système de prévision intégré (IFS en anglais) du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT ; courbes noires et rouges dans Fig. 2.1b).

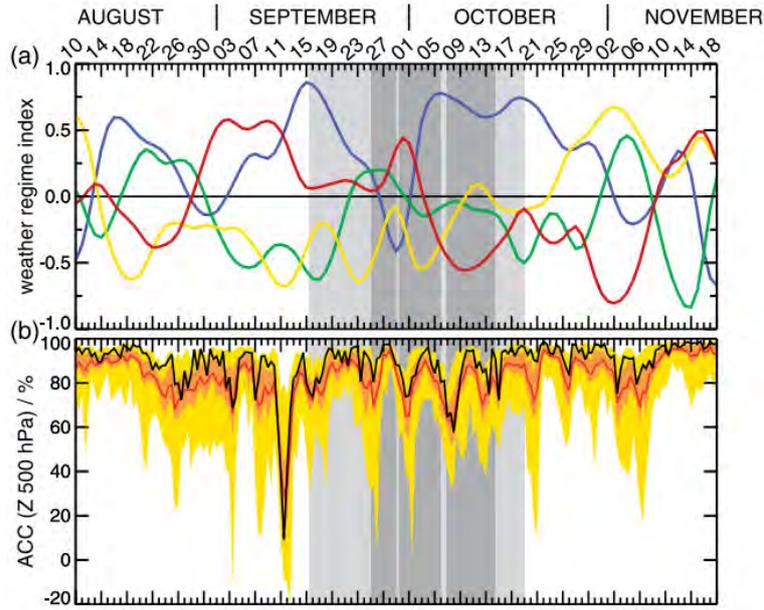


FIGURE 2.1 – (a) Indices des régimes de temps en Atlantique nord pendant NAWDEX, tirés de Schäfler *et al.* (2018). Les indices y sont définis selon l'étude de Michel et Rivière (2011). Les courbes de couleur font référence au blocage scandinave (en bleu), à la phase positive de l'oscillation nord atlantique (en rouge), à la phase négative de l'oscillation nord atlantique (en vert) et à la dorsale atlantique (en jaune). Les régimes de temps sont identifiés selon l'approche par clustering de Michelangeli *et al.* (1995). (b) Série temporelle du coefficient de corrélation de l'anomalie de la hauteur du géopotential à 500 hPa sur une région allant de 35° à 75° N et de 60° à 0° W pour un délai de prévision de 120 h avant la date considérée. Les lignes en noir et en rouge correspondent respectivement aux prévisions déterministes de l'IFS et à la moyenne de l'ensemble des membres. Les zones en orange et en jaune représentent respectivement la moitié et l'ensemble des membres. Les boîtes en gris clair indique la période de la campagne NAWDEX et celles en gris foncé la durée des séquences météorologiques définies dans Schäfler *et al.* (2018).

NAWDEX fait suite à la campagne de mesure FASTEX (*Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment*) organisée en 1997 au-dessus de l'Atlantique nord (Joly *et al.*, 1999). Elle s'inscrit également dans la continuité d'une série de campagnes de mesure menée dans les années 2000 dans le cadre du programme THORPEX (*The Observing System Research and Predictability Experiment*) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Toutes ces campagnes de mesure ont récolté des observations dans les régions où la prévisibilité des cyclones tropicaux et extra-tropicaux déclinait dans les modèles de prévision numérique du temps. À titre d'exemple, l'assimilation d'environ 1600 profils de vent dans le modèle du CEPMMT a réduit de 3% l'erreur de prévision de la hauteur du géopotentiel à 500 hPa à échéance de 48-96 h en Europe (Weissmann et Cardinali, 2007). NAWDEX offre une nouvelle approche en s'intéressant aux régions dans lesquelles la représentation des processus diabatiques dans les modèles de prévision est soumise à de nombreuses incertitudes. C'est le cas notamment dans les WCB. L'un des objectifs principaux de NAWDEX était donc d'observer par télédétection la structure nuageuse et la dynamique interne des WCB et d'y effectuer des mesures in-situ. Quatre régions étaient principalement visées : le flux d'entrée de la WCB, ses régions d'ascendances, son flux en sortie et les régions impactées en aval de la tempête (respectivement numérotées 1, 2, 3 et 4 dans Fig. 2.2).

Le déploiement d'un large éventail de moyens d'observation à l'échelle internationale ainsi que la forte coopération qui s'est opérée entre les différents pays participants (États-Unis, Canada, Royaume-Uni, France, Suisse, Islande et Allemagne) ont permis de fournir des observations rares au sein des tempêtes nord-atlantiques, plus particulièrement dans les WCB associées.

2.1.2 Moyens d'observations

Quatre avions de recherche instrumentés ont été déployés lors de la campagne de mesure. Les deux avions allemands, le HALO (*High Altitude and Long range research Aircraft*) et le Falcon 20 du DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*), ont survolé les régions nord-atlantiques situées au-dessus de 45° N depuis l'aéroport de Keflavík (Islande). La grande capacité de vol du HALO et l'instrumentation de télédétection sophistiquée embarquée à son bord ont permis d'observer les processus diabatiques au sein des tempêtes se développant au milieu de l'océan Atlantique nord. Le Falcon du DLR a effectué des vols coordonnés avec le Falcon-20 de SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) dans les tempêtes se rapprochant des côtes islandaises. Les comparaisons entre les profils verticaux du vent et de la microphysique nuageuse internes aux WCB, obtenus à partir des divers instruments de télédétection installés sur les deux avions, ont été utiles pour la préparation de futures missions spatiales (Illingworth *et al.*, 2015). Le Falcon du DLR et le Falcon-20 ont également observé les variations du courant jet d'altitude au-dessus de l'Islande, tout comme l'avion anglais du

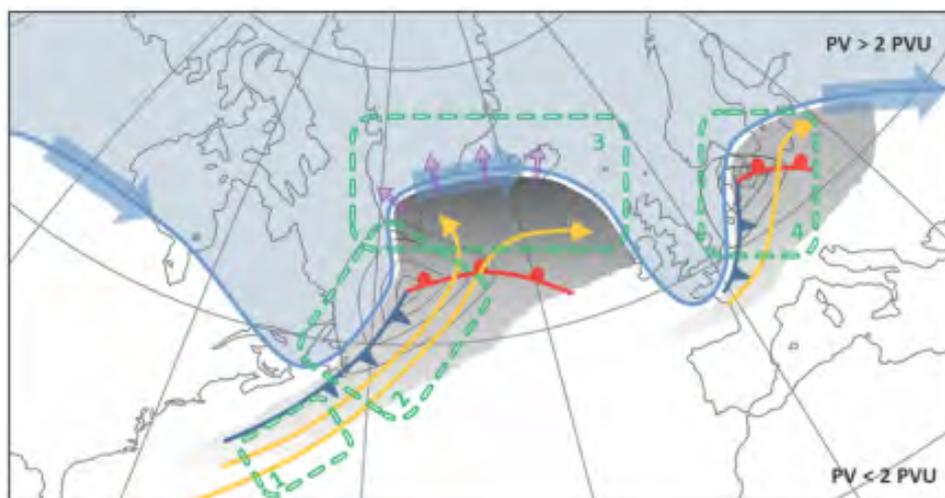


FIGURE 2.2 – Schéma d’une situation météorologique propice aux objectifs de NAWDEX, tiré de Schäfler *et al.* (2018). La ligne bleue indique l’emplacement du guide d’onde avec l’air stratosphérique d’un côté (fond bleu avec des valeurs de $PV > 2$ PVU) et de l’autre l’air troposphérique (fond blanc). Le courant-jet d’altitude se déplace en suivant le guide d’ondes (flèches bleu foncé). Les lignes grises, rouges et bleu foncé montrent respectivement l’emplacement du centre cyclonique de la dépression ainsi que des fronts chauds et froids en surface. Les flèches jaunes et violettes schématisent respectivement les masses d’air ascendantes des WCB et le flux divergent associés au niveau de la tropopause. Les quatre cadres verts délimitent les principales régions d’intérêt de NAWDEX.

FAAM (*Facility for Airborne Atmospheric Measurements*) sur une période plus réduite.

Les quatre avions ont effectué 47 vols et totalisé plus de 200 h de vol pendant NAWDEX. Près de 300 lâchés de dropsondes ont aussi fourni de précieuses informations sur la structure verticale du vent, de la température et de l’humidité au sein des tempêtes nord-atlantiques. Un demi-millier de radiosondages, procédés depuis 40 stations météorologiques réparties sur 14 pays, ont complété les observations aériennes.

Dans la suite, les données du radar de nuages à 95 GHz RASTA (*RAdar Airborne System*) embarqué à bord du Falcon-20 (Delanoë *et al.*, 2013) sont exploitées. Le radar a une portée maximale de 15 km pour une résolution de 60 m. Grâce à 3 antennes pointant dans trois directions non-colinéaires, RASTA mesure la réflectivité et reconstitue les trois composantes du vent en utilisant l’effet Doppler. La résolution temporelle entre deux mesures est de 750 ms, ce qui correspond à une résolution horizontale de 300 m si l’on considère une vitesse typique de 800 km h^{-1} pour le Falcon-20. La réflectivité minimale détectable est d’environ -35 dBZ à 1 km avec une précision de 2 dBZ.

Pour compléter les observations de la campagne NAWDEX, les structures nuageuses des tempêtes ont été observées à grande échelle grâce au radiomètre SEVIRI (*Spinning*

Enhanced Visible and Infrared Imager) installé à bord du satellite géostationnaire MSG (*Meteosat Second Generation*). Ce dernier mesure l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique dans douze bandes spectrales allant du visible (~ 450 nm) à l'infrarouge thermique ($\sim 13,4$ μm). Le satellite donne alors accès à de multiples informations comme la quantité de vapeur d'eau atmosphérique, la température de surface de l'océan ou encore celle du sommet des nuages avec une résolution de plusieurs kilomètres (3 km au nadir). Seule la température de brillance du canal à $10,8$ μm , le plus sensible à la température des sommets nuageux, sera étudiée par la suite.

2.1.3 Cas du 2 octobre 2016

Cette thèse se focalise sur la tempête baptisée « Stalactite » dont le cycle de vie se déroule du 30 septembre au 3 octobre 2016. La tempête s'est formée au large des côtes sud de Terre-Neuve suite à l'interaction barocline de deux maxima de tourbillon potentiel en surface (non montrés) avec une anomalie locale de PV située dans les couches supérieures de l'atmosphère. Cette dernière (AN sur Fig. 2.3b,c,d,e,f), probablement issue d'un vortex polaire localisé au-dessus du Groenland (VP sur Fig. 2.3a), s'en est détachée (Fig. 2.3b,c) et a persisté lors de l'interaction barocline tout en interagissant avec un creux en amont (Fig. 2.3d,e). La tropopause au centre du système tourbillonnaire ainsi formé était alors très basse, d'où le nom « Stalactite » (Fig. 2.3f). La tempête se développe ensuite en s'éloignant du continent (Fig. 2.4a). Son creusement s'accroît par interaction barocline avec l'anomalie cyclonique d'altitude lors de sa traversée de l'Atlantique nord (Fig. 2.4b). La pression en son centre chute alors de plus de 24 hPa entre le 1^{er} et le 2 octobre, faisant d'elle une « bombe météorologique » (Sanders et Gyakum, 1980). La tempête est en phase mature lorsqu'elle se rapproche des côtes islandaises le 2 octobre (Fig. 2.4c). L'image prise par MSG dans le visible à 12 UTC montre bien l'enroulement de la longue traînée nuageuse, caractéristique de la WCB, autour du centre cyclonique (Fig. 2.5). Le creusement atteint un pic d'intensité de 960 hPa à 21 UTC. La progression de la tempête vers l'ouest est bloquée par l'anticyclone positionné au-dessus de la Scandinavie. Elle est finalement poussée vers le Groenland où elle termine sa course dans la journée du 3 octobre (Fig. 2.4d).

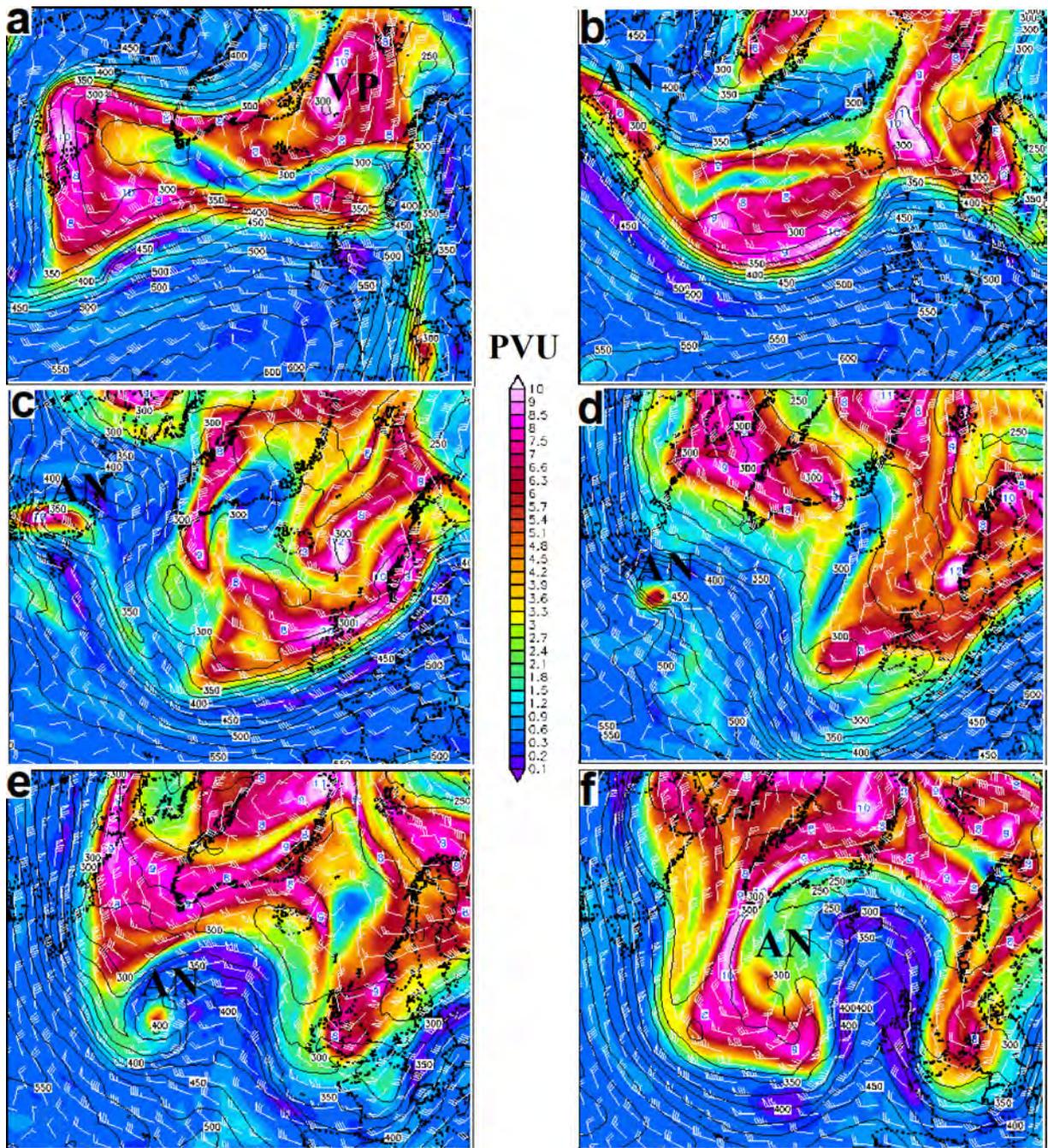


FIGURE 2.3 – Champs de PV à $\theta=320$ K issus des archives du site <http://www2.wetter3.de/> le (a) 27 septembre 2016 à 12 UTC, (b) 28 septembre 2016 à 12 UTC, (c) 29 septembre 2016 à 12 UTC, (d) 30 septembre 2016 à 12 UTC, (e) 1^{er} octobre 2016 à 12 UTC, (f) 2 octobre 2016 à 12 UTC. Les valeurs du champ de PV sont représentées par la plage colorée (en PVU). Les contours noirs indiquent le niveau de l'isentrope $\theta=320$ K (en hPa) et les flèches blanches la vitesse du vent à $\theta=320$ K (en nœuds). Les lettres VP et AN localisent respectivement le vortex polaire et l'anomalie de PV à l'origine de la formation de la tempête Stalactite.

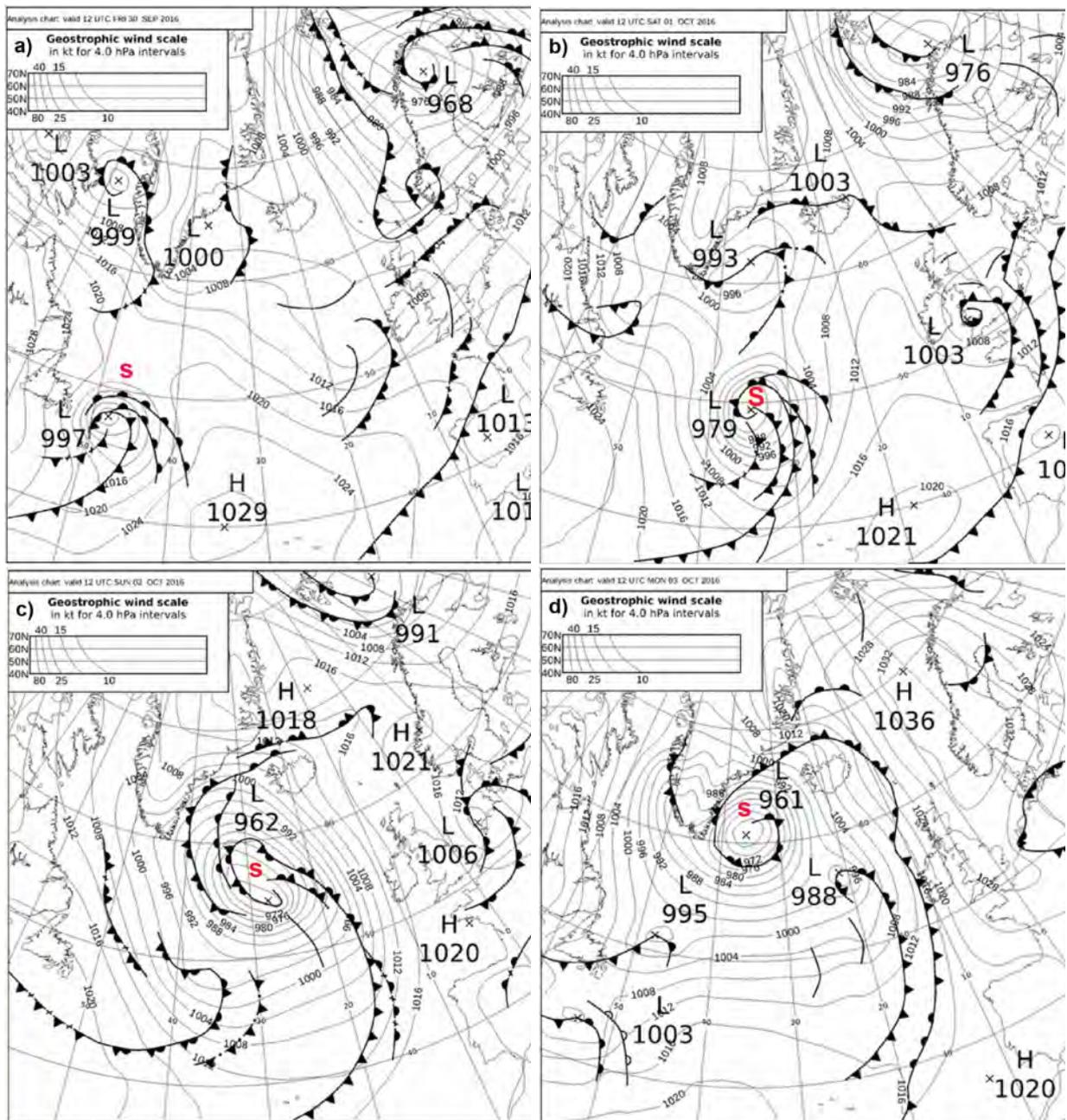


FIGURE 2.4 – ANASYG (ANALYSES SYNOPTIQUES GRAPHIQUES) issues du Met Office décrivant la situation synoptique en Atlantique nord le (a) 30 septembre 2016 à 12 UTC, (b) 1^{er} octobre 2016 à 12 UTC, (c) 2 octobre 2016 à 12 UTC, (d) 3 octobre 2016 à 12 UTC. L'emplacement de la tempête Stalactite est symbolisé par la lettre S en rouge.

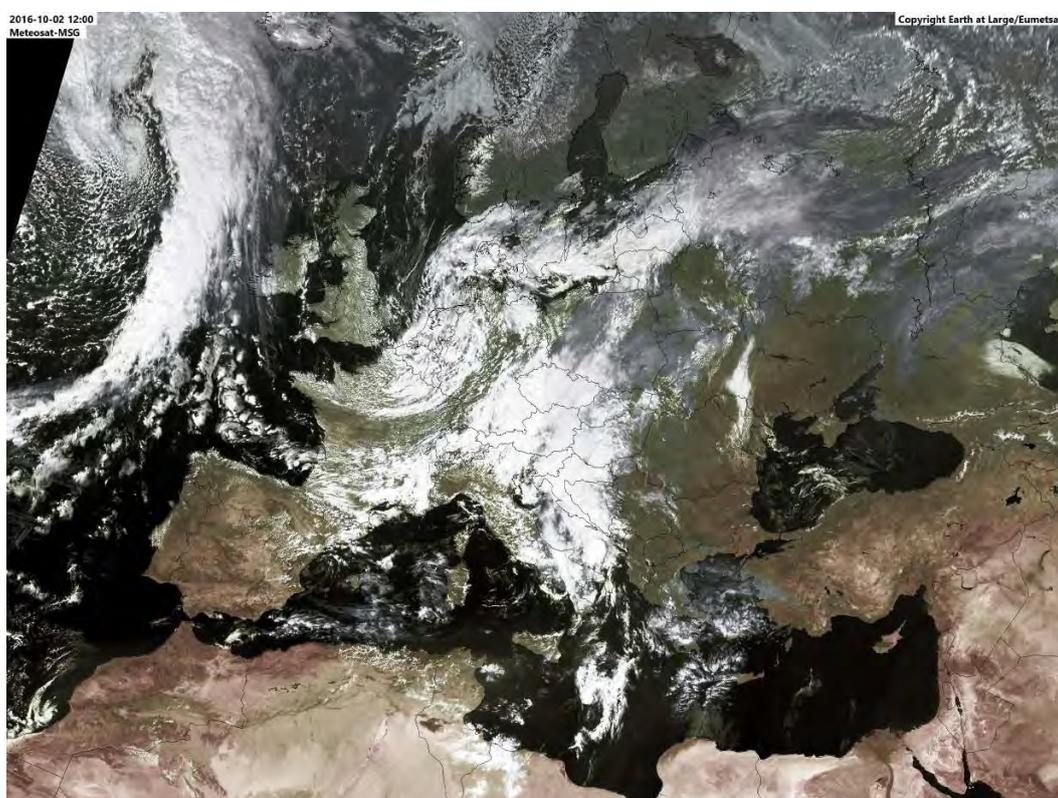


FIGURE 2.5 – Image dans le visible du satellite MSG le 2 octobre 2016 à 12 UTC. La structure nuageuse associée à la tempête Stalactite se situe au nord-ouest de l'image.

Les vols de recherche (RF ci-après) au-dessus de la tempête Stalactite font partie de l'une des périodes d'observations intensives (IOP en anglais) les plus importantes de NAWDEX. La tempête fait en effet partie des cyclones extra-tropicaux suspectés d'avoir renforcé le blocage scandinave entre le 1^{er} et le 5 octobre. Tout comme pour chaque IOP, de nombreuses heures de préparation ont été nécessaires en amont afin d'identifier les régions d'intérêt et de définir les plans de vol les plus adéquats à la situation météorologique. Un vol du Falcon du DLR et deux vols du Falcon-20 de SAFIRE ont été réalisés le 2 octobre depuis l'aéroport de Keflavík situé au sud-ouest de l'Islande lors de l'IOP6. Un vol du HALO était également prévu mais un problème technique l'a empêché de décoller. Les deux avions instrumentés ont d'abord effectué un vol coordonné dans la matinée (RF06). Ce dernier s'est effectué au-dessus du flux de sortie de la WCB associée à la tempête Stalactite. La structure nuageuse et la dynamique internes de la WCB ont alors pu être observées à fine échelle grâce au radar Doppler RASTA embarqué à bord du Falcon-20. Une partie de l'intrusion sèche a également été captée au cours du vol. C'est à ce vol du matin du Falcon-20 qu'est consacré le chapitre 4. Les profils de vent et de réflectivité relevés par les deux avions ont fourni des résultats similaires, en accord avec les profils de température, d'humidité et de vent obtenus à partir des dropsondes Vaisala lâchées à l'occasion (non montré). Le Falcon-20 a effectué un deuxième vol dans l'après-midi (RF07). Il a cette fois-ci survolé les régions d'ascendances de la WCB entre 13 et 16 UTC. C'est sur ce dernier vol que se concentre le chapitre 3.

2.2 Simulation et outils d'analyse

2.2.1 Le modèle Méso-NH

Méso-NH est le modèle de recherche atmosphérique développé par le Laboratoire d'Aérodynamique et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) depuis près de 30 ans (Lac *et al.*, 2018). Sa large gamme de résolution spatiale permet d'étudier des phénomènes atmosphériques allant de l'échelle turbulente (tourbillons dans la couche limite, entraînement dans les nuages) à l'échelle synoptique (cyclones, tempêtes, anticyclones). Afin de représenter au mieux les interactions entre les divers processus, Méso-NH est couplé avec différents modules décrivant la dynamique, la chimie, le rayonnement et les espèces microphysiques au sein de l'atmosphère, des océans et des surfaces continentales (Fig. 2.6). Le modèle, non-hydrostatique et anélastique, élimine tout problème lié à la propagation des ondes acoustiques rapides (Lafore *et al.*, 1998). Les simulations présentées dans cette thèse ont été réalisées avec la version 5.3 de Méso-NH.

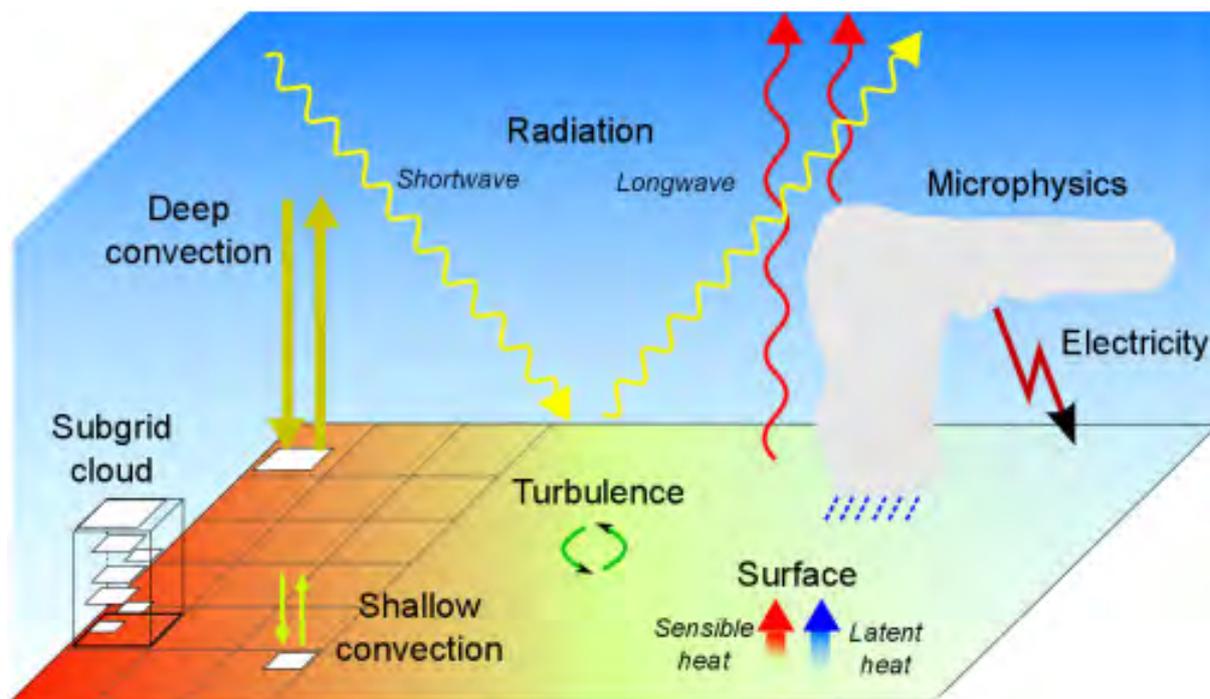


FIGURE 2.6 – Aperçu des schémas de paramétrisation activables dans Méso-NH, tiré de Lac *et al.* (2018). Les schémas de convection profonde, de nébulosité fractionnaire d'échelle sous-maille et d'électricité ne sont pas activés dans cette étude de cas.

Le modèle numérique utilise le schéma de surface SURFEX (SURFace Externalisée) pour représenter les échanges de flux entre les surfaces et l'atmosphère (Masson *et al.*, 2013). La dynamique atmosphérique est régie par le schéma d'advection eulérien d'ordre 5 WENO (*Weighted Essentially Non-Oscillatory*, Shu et Osher, 1988) décrivant l'évolution des trois composantes du vent (u, v, w). Les autres variables pronostiques du modèle, l'énergie cinétique turbulente, la température potentielle et les rapports de mélange des diverses phases de l'eau, sont transportées par le schéma d'advection PPM (*Piecewise Parabolic Method*, Colella et Woodward, 1984). Les variables sont localisées sur une grille étirée de type C selon la classification de Arakawa (1966). La turbulence est représentée à l'aide d'un schéma de fermeture d'ordre 1,5 (Cuxart *et al.*, 2000). Les processus microphysiques au sein des nuages sont paramétrés par le schéma microphysique à un moment ICE3 (Pinty et Jabouille, 1998). L'eau y est décrite sous 6 espèces : gazeuse (vapeur d'eau), liquide (gouttelette, pluie) et glacée (cristaux de glace, neige et graupel). Les processus radiatifs sont simulés avec le code de rayonnement développé par le CEPMMT. La convection peu profonde est paramétrée par le schéma de Pergaud *et al.* (2009) de type EDMF (*Eddy Diffusivity Mass Flux*).

L'obtention d'une représentation réaliste de la tempête Stalactite avec le modèle a nécessité la puissance de calcul de 256 processeurs, soit une dizaine de milliers d'heures de calcul. Cela s'explique par le besoin de représenter explicitement la convection profonde sur un grand domaine. Ce dernier a été choisi de sorte à intégrer l'ensemble des masses d'air de la tempête dans la journée du 2 octobre. Il couvre ainsi l'Islande, la partie sud-est du Groenland, les Îles Féroé et les zones survolées par le Falcon-20, soit une région de 2000 km x 2000 km (Fig. 2.7).

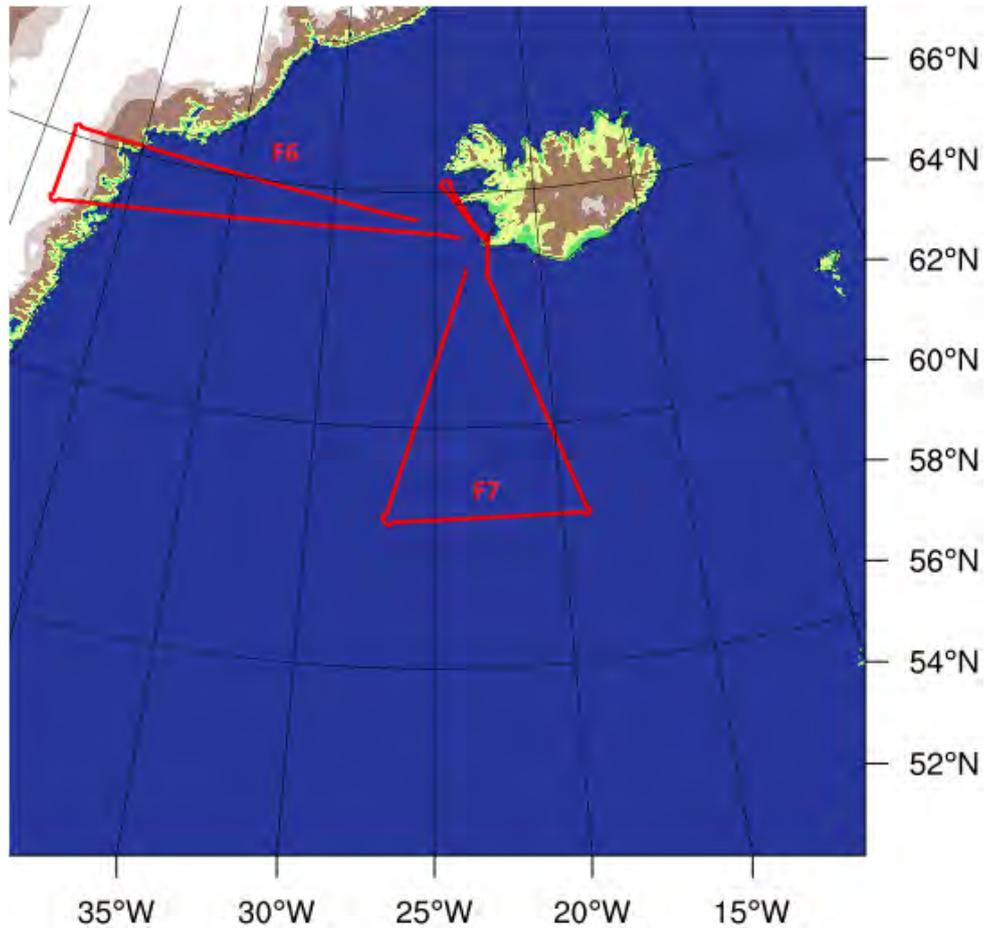


FIGURE 2.7 – Domaine dans lequel les simulations ont été effectuées. Les segments rouges représentent le trajet des deux vols du Falcon-20 le 2 octobre (F6 pour celui du matin et F7 pour celui de l'après-midi). Les couleurs représentent la topographie du domaine (en bleu l'océan, en marron le relief montagneux de l'Islande et en blanc le plateau élevé du Groenland).

Deux simulations Mésos-NH de la tempête ont été réalisées avec une maille horizontale de 2,5 km, permettant ainsi une représentation explicite de la convection profonde. La grille verticale du modèle utilisée ici comprend 51 niveaux répartis depuis la surface jusqu'à plus de 18 km d'altitude avec un espacement de 60 m dans les premiers niveaux et de 600 m environ en stratosphère. Les simulations ont été initialisées le 2 octobre à 00 UTC à partir des analyses du CEPMMT dont la résolution horizontale avoisine les 9 km au-dessus de l'océan Atlantique nord. La tempête commençait alors à entrer dans le domaine de simulation par le sud-ouest. Elle a été simulée jusqu'au 3 octobre à 12 UTC, moment correspondant à la sortie de son centre cyclonique au nord-ouest du domaine. Seules les 24 premières heures ont été étudiées, période pendant laquelle la tempête Stalactite continuait de se creuser. Les conditions au bord du domaine ont été actualisées toutes les 6 heures avec les analyses du CEPMMT. Pour une meilleure compréhension de la structure nuageuse et de la dynamique internes de la tempête, plus de 200 variables ont été analysées à chaque sortie du modèle. Cela a créé des fichiers de sortie atteignant près de 50 Go et a ainsi limité leur fréquence de sortie à 1 heure. Plus de 1,8 To de données ont donc été produites au cours de cette thèse. Une fréquence de sortie horaire a suffi pour suivre en détail l'évolution des masses d'air au sein de la WCB. Le code de transfert radiatif RTTOV (*Radiative Transfer model for the TIROS Operational Vertical sounder* Saunders *et al.*, 2018) a été appliqué aux sorties Mésos-NH pour simuler les températures de brillance au sommet des nuages (Chaboureau *et al.*, 2008), rendant possible la comparaison de la hauteur de la couverture nuageuse simulée avec les observations du satellite MSG dans l'infrarouge thermique. Les réflectivités synthétiques ont été calculées à partir d'un simulateur de radar développé par Richard *et al.* (2003) puis confrontées aux relevés de réflectivité effectués par le radar Doppler RASTA au sein de la WCB associée à la tempête Stalactite.

Une simulation de sensibilité aux processus nuageux se déroulant dans la WCB a également été réalisée. Les taux de dégagement de chaleur latente et de refroidissement issus des processus nuageux ont été coupés dans le schéma microphysique ICE3, supprimant ainsi l'effet diabatique des processus nuageux sur l'ensemble du domaine de simulation pendant toute la période considérée. L'objectif de cette simulation de sensibilité est de déterminer les impacts du dégagement de chaleur latente provoqué par les processus nuageux sur la dynamique associée à la tempête Stalactite.

2.2.2 Trajectoires lagrangiennes

Les trajectoires de la WCB associée à la tempête Stalactite ont été identifiées à partir de l'outil lagrangien développé dans Mésos-NH par Gheusi et Stein (2002). Trois étapes ont été nécessaires. Tout d'abord, chaque particule d'air initialement localisée à \vec{x}_0 à un instant t_0 sur chaque point de grille du modèle s'est vue attribuée un traceur passif 3D. Ces traceurs passifs enregistrent alors à chaque pas de temps t du modèle (ici toutes les 20 s ;

calcul « en ligne ») la position des particules d'air advectées par les différents processus de transport du modèle (ici les trois composantes du vent ainsi que les mouvements turbulents et convectifs). Cette technique permet ainsi d'obtenir la trajectoire complète d'une particule d'air depuis sa position initiale à n'importe quel instant t_j souhaité comme le montre la figure 2.8.

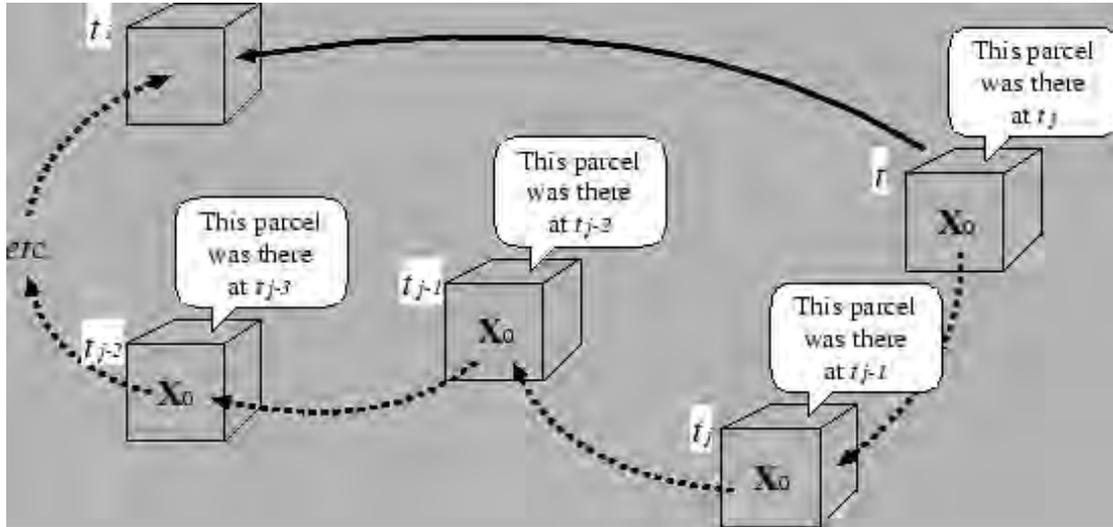


FIGURE 2.8 – Schéma de l'algorithme permettant de suivre l'évolution des caractéristiques d'une particule d'air X_0 à chaque instant t_j , tiré de Gheusi et Stein (2005, *Lagrangian trajectory and air-mass tracking analyses with MesoNH by means of Eulerian passive tracers*) disponible sur http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh/dir_doc/lag_m46_22avril2005/lagrangian46/.

Cet outil est donc particulièrement adapté pour suivre les mouvements convectifs au sein des WCB puisque le calcul des différentes trajectoires des particules d'air bénéficie de la haute résolution temporelle du modèle. De plus, la valeur de toute variable α le long d'une trajectoire peut être obtenue a posteriori à partir du champ eulérien de α tel que :

$$\alpha_{traaj}(t_j) = \alpha_{Eul}(\vec{X}(t_j), t_j) \quad (2.1)$$

L'outil est alors aussi très utile pour étudier les changements des propriétés de chaque particule d'air. Un fichier de sortie, contenant les variables suivies le long des trajectoires (altitude, rapports de mélange des hydrométéores et composantes du vent entre autres), est écrit à la même fréquence que les sorties des simulations (soit toutes les heures). Pour les besoins de cette thèse, la température potentielle et le PV ont été rajoutés aux variables suivies le long des trajectoires lagrangiennes.

Les trajectoires de la WCB associée à la tempête Stalactite sont identifiées dans les simulations. Le critère standard de sélection en pression est de 600 hPa en 48 h (e.g., Madonna *et al.*, 2014; Martínez-Alvarado *et al.*, 2014b; Oertel *et al.*, 2020). Ce critère est ici ramené à une ascendance d'au moins 150 hPa dans une fenêtre temporelle de 12 h centrée autour des observations du Falcon-20 relatives aux vols RF06 (entre 00 et 12 UTC le 2 octobre) et RF07 (entre 10 et 22 UTC le 2 octobre). Cette fenêtre temporelle a été choisie afin que l'ensemble des trajectoires se situant près des zones observées restent à l'intérieur du domaine de simulation, notamment celles soumises à des vitesses de vent plus élevées en haute troposphère. Le critère ne permettant pas formellement d'identifier les trajectoires complètes de la WCB depuis la couche limite jusqu'à la haute troposphère, les trajectoires sélectionnées sont simplement appelées « ascendances ». Inspirée de Rasp *et al.* (2016) et Oertel *et al.* (2019), une distinction est faite entre les ascendances « lentes » et les ascendances « rapides ». Sont considérées comme « rapides » les ascendances qui ont connu au moins une période avec un taux d'élévation supérieur à $100 \text{ hPa } 2\text{h}^{-1}$. De telles périodes de 2 h sont définies comme « segments rapides ». Les ascendances ne respectant pas ce critère sont définies comme « lentes ».

2.2.3 Outil d'identification d'objets 3D

L'identification des mouvements convectifs locaux au sein de la WCB associée à la tempête Stalactite s'est effectuée à partir de l'outil d'identification d'objets 3D développé par Dauhut *et al.* (2016) dans le modèle. Cet outil, initialement conçu pour étudier l'orage Hector en Australie, considère les courants ascendants comme des objets 3D constitués de points de grille connectés pour lesquels la vitesse verticale dépasse un seuil arbitraire modifiable par l'utilisateur. Deux points de grilles sont considérés comme connectés s'ils ont en commun une face horizontale ou verticale, comme l'illustre la figure 2.9.

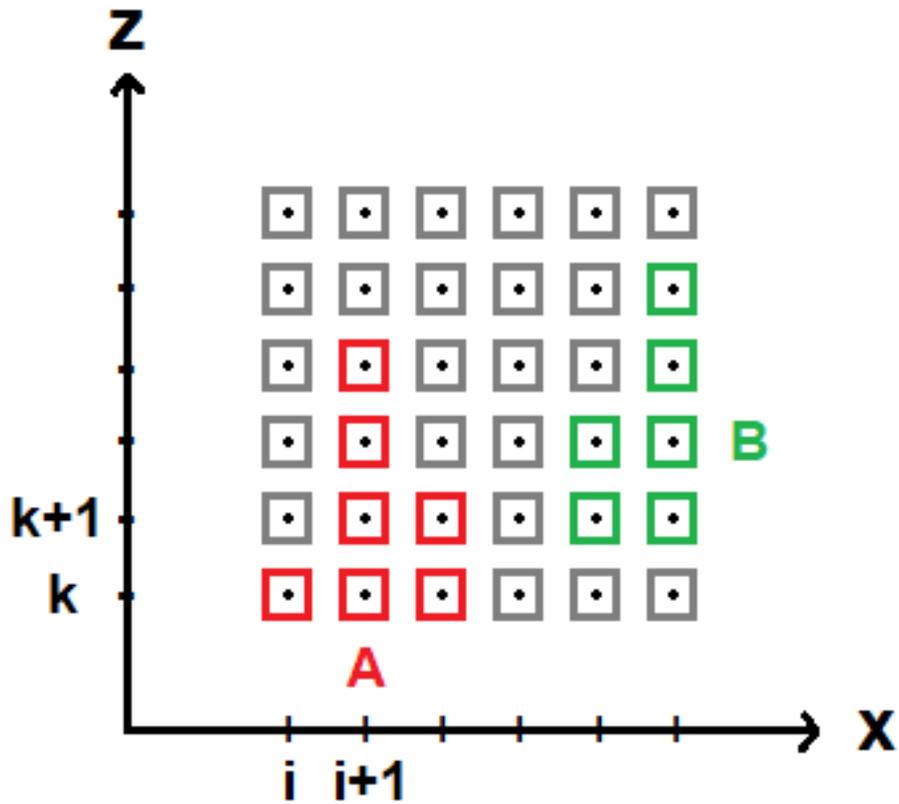


FIGURE 2.9 – Schéma 2D illustrant le fonctionnement de l'outil d'identification d'objets 3D. Sur l'exemple, les mailles (carrés) colorées indiquent celles où la valeur seuil d'une variable α est dépassée en leur point de grille (points noirs). Elles forment ici deux objets 3D cohérents, A en rouge et B en vert.

Trois champs 3D sont alors générés à chaque sortie du modèle : un numéro d'identité pour l'objet 3D, le niveau d'altitude où celui-ci a été identifié pour la première fois ainsi que la section horizontale de l'objet au niveau actuel. L'identification des objets se poursuit verticalement à chaque niveau k du modèle. Ces champs, homogènes à l'intérieur de chaque niveau pour chaque objet identifié, permettent donc de caractériser la hauteur et la taille des courants ascendants présents dans le domaine de simulation à un instant t .

Dans cette thèse, les mouvements ascendants sont identifiés dès lors qu'ils dépassent le seuil de vitesse verticale fixé à $w=0,3 \text{ m s}^{-1}$. Moyennant quelques modifications du code source, l'outil de clustering autorise aussi l'étude d'autres champs pour la détection d'objets 3D. Les structures de PV négatif sont alors détectées en-dessous d'un seuil de valeur de PV et leurs caractéristiques spatio-temporelles étudiées. Ce seuil est fixé à -1 PVU .

2.2.4 Bilan eulérien

Méso-NH offre aussi la possibilité de réaliser des bilans eulériens sur chaque variable prognostique α du modèle via l'équation 2.2 :

$$\frac{\partial (\tilde{\rho}\alpha)}{\partial t} = -\frac{\partial (\tilde{\rho}U\alpha)}{\partial x} - \frac{\partial (\tilde{\rho}V\alpha)}{\partial y} - \frac{\partial (\tilde{\rho}W\alpha)}{\partial z} + \sum_{p_i} S_{\alpha_p} \quad (2.2)$$

Les trois premiers termes de l'équation à droite sont les termes d'advection de α dans les trois directions x , y et z . S_{α_p} représente la somme des différentes sources et puits de α dus aux processus physiques p_i .

À noter que le bilan s'effectue sur $\tilde{\rho}\alpha$, soit le produit de la variable α par la masse d'air sec contenue dans un volume de grille. Ce dernier correspond à un domaine cartésien délimité par des coordonnées horizontales ou est défini par un masque, suivant le choix de l'utilisateur. L'intégration du domaine sur la verticale peut se faire entre deux niveaux du modèle. L'utilisateur choisit également la durée de l'intégration.

Par la suite, un bilan eulérien de la température potentielle θ et du rapport de mélange de vapeur d'eau r_v est réalisé à chaque niveau du modèle pendant 1 h à partir de la simulation de référence et celle de sensibilité dans une boîte couvrant en partie les régions ascendantes de la WCB. Les processus diabatiques influençant θ et r_v (turbulence, microphysique et rayonnement pour θ) ainsi que les termes d'advection sont alors étudiés.

