

Rapport de stage

"Phénomènes météorologiques violents - Etudes des supercellules et des tornades"

DUTHEIL Pierre-Antoine
2nd année en DUT Mesures Physiques
Année scolaire 2008-2009



Maîtres de stage : Dr Jeffrey B. Basara and Bradley Illston
Tutrice : Mlle Françoise Nardoux

Remerciements

Avant de vous expliquer mon expérience et mon travail ici, j'aimerais remercier le département de Mesures Physiques qui m'a donné l'opportunité de travailler ici et d'avoir la meilleure expérience jamais eue. En effet, ce stage m'a permis de comprendre le mécanisme des supercellules, des tornades et d'autre part il m'aura permis de chasser ces phénomènes.

Ce fut une réelle satisfaction de travailler avec des personnes professionnelles et de partager ma passion avec elles. J'aimerais beaucoup remercier Jeff Basara et Brad Illston pour leur accueil, leur aide et leur patience. De plus, je remercie énormément Jeff pour tous ces miles parcourus afin de chasser la meilleure supercellule pouvant produire une tornade. Je remercie aussi énormément Brad qui m'a permis de participer à ses cours de météorologie et qui a essayé de m'impliquer dans le milieu des chasseurs d'orages de la Discovery Channel. De plus, j'aimerais remercier Laurent Bourdier et Françoise Nardou qui m'ont aidé pour mon voyage et pour mon stage.

Enfin, je veux remercier tous les gens qui m'ont aidé aux Etats-Unis, dans l'aéroport, les serveuses à la cafeteria du National Weather Center ainsi que la météo qui m'a permis d'observer de superbes orages et une tornade surprise de nuit.

Sommaire

INTRODUCTION	4
I. Experience en Oklahoma	5
1. Etat d'Oklahoma.....	5
2. L'Université d'Oklahoma.....	6
3. Le National Weather Center	8
4. L'Oklahoma Climatological Survey et Logiciels utilisés	9
5. Expérience personnelle et travaux	11
II. Radiosondages.....	12
1. Introduction	12
2. L'hodographe et les vents.....	13
3. Paramètres météorologiques basiques	15
4. Paramètres des phénomènes météo violents	16
5. Indices caractérisant les phénomènes météo violents	21
III. Les Supercellules.....	23
1. Introduction	23
2. Caractéristiques principales	24
3. La structure des supercellules	25
4. Le mécanisme des supercellules	27
5. Ingrédients nécessaires	28
6. Echos Radars	30
7. Cas de supercellules.....	31
8. Les supercellules en Oklahoma	32
IV. Les tornades	33
1. Introduction et Cas.....	33
2. Mécanisme et Structure	35
3. Ingrédients	38
4. Echos radars.....	39
5. Chasses aux orages et aux tornades	40
6. Avis et Classification des tornades	44
CONCLUSION.....	46
ANNEXES	47

INTRODUCTION

J'ai voulu réaliser mon stage aux Etats-Unis pour deux raisons :

Tout d'abord, je voulais réaliser ce stage car il est le seul en relation avec ma passion, où je peux étudier les phénomènes météo violents tels que les supercellules ou les tornades. Le National Weather Center, situé dans l'Etat d'Oklahoma et dans l'allée des tornades est le meilleur endroit pour étudier ces phénomènes et les chasser sur le terrain. J'ai acquis des bases en météorologie et les utilisées pour mes prévisions météorologiques en France mais ces connaissances ne sont pas assez développées dans la prévision des orages.

La seconde raison, à mon avis, est que ce stage est la meilleure façon d'apprendre l'anglais car je suis impliqué dans la vie américaine et je dois parler l'anglais au quotidien. De plus, celui-ci me permet de découvrir une autre culture, un mode de vie différent et de rencontrer beaucoup de personnes. Finalement, ce stage est un bon moyen pour comprendre le fonctionnement d'une entreprise. C'est aussi un très bon moyen pour apprendre les paramètres météorologiques relatifs aux phénomènes météorologiques violents ainsi que les index et les radiosondages. De plus, j'ai un rêve : voir et étudier une tornade.

Pendant ce stage, j'étudierai en détails la formation des supercellules et des tornades. C'est pourquoi, la thermique et la thermodynamique sont importantes pour comprendre tous ces mécanismes. J'étudierai plusieurs cas de supercellules qui ont produit des tornades. De plus, je les chasserai sur le terrain pour mieux comprendre la relation entre la Physique/les Maths et la réalité sur le terrain.

Je parlerai, dans la première partie de mon rapport de mon expérience dans l'Oklahoma avec une description de l'Etat, de l'Université, du National Weather Center et enfin de mon expérience personnelle. Dans une seconde partie, j'expliquerai en détail un outil très important dans la prévision météorologique : les radiosondages. Dans une troisième partie, j'étudierai le mécanisme, la structure et les ingrédients nécessaires à la formation des supercellules. J'ajouterai des informations supplémentaires sur les cas de ces phénomènes en Oklahoma. Finalement, j'expliquerai du mieux possible, la structure et le mécanisme des tornades ainsi que quelques théories. Ce rapport se terminera avec les alertes météorologiques et mon expérience en matière de chasse aux orages et aux tornades.

I. EXPERIENCE EN OKLAHOMA

1. Etat d'Oklahoma



Fig. 1 : Les Etats-Unis d'Amérique avec l'Oklahoma en couleur

L'Oklahoma ou "L'Etat des Sooners" est l'un des 50 Etats des Etats Unis d'Amérique . Il est entouré par 6 Etats : le Texas, le Missouri, l'Arkansas, le Kansas, le Nouveau-Mexique et enfin le Colorado. Il est divisé en 77 comtés, a une superficie de 184 000 km² et environ 3 500 000 habitants vivent dans cet Etat. La capitale économique est Tulsa mais la capitale politique est Oklahoma City située dans le comté d'Oklahoma dans le centre Oklahoma. Cette dernière a une population proche d'un demi-million et est en pleine expansion avec de nouvelles constructions de bâtiments. De plus les prix des maisons sont beaucoup moins élevés que dans les autres Etats comme l'Etat de New York par exemple.



Fig. 2 : L'Etat d'Oklahoma

Depuis 1964, l'Etat d' Oklahoma a toujours été politiquement républicain. En effet, John Mac Cain a enregistré son meilleur score avec 66% durant la dernière élection présidentielle.



Fig. 3 : Le sceau de l'Etat d'Oklahoma



Fig. 4 : Le drapeau de l'Etat d'Oklahoma

Enfin, l'Oklahoma est un Etat agricole et industriel : il est en effet le troisième et le sixième producteur américain de pétrole et de gaz naturel. En effet, on peut trouver dans cet Etat beaucoup d'industries en relation avec le pétrole et la chimie.

2. L'Université d'Oklahoma



Fig. 5 : Sceau et logo de l'Université d'Oklahoma

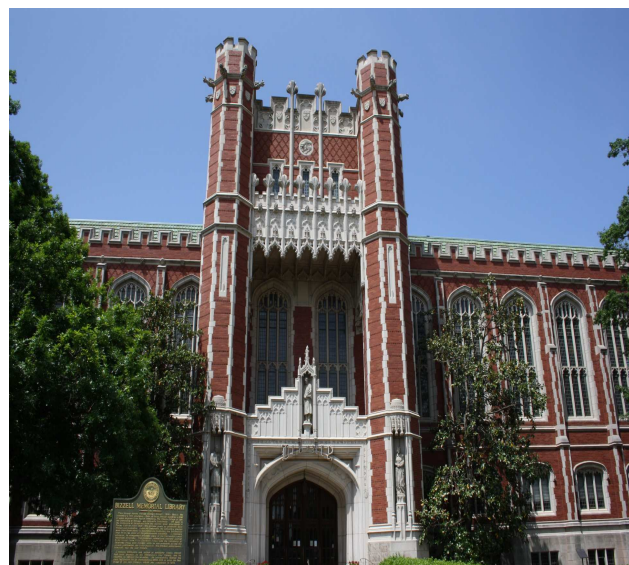


Fig. 6 : La bibliothèque de Bizzell

L'Université d'Oklahoma ou "OU" est une université de recherche co-éducationnelles située à Norman dans le comté de Cleveland. L'Université se compose de quinze collèges (universitaires), dont 152 domaines tels que la météorologie, la géologie, l'ingénierie pétrolière, l'architecture, le droit, la médecine, les Indiens d'Amérique, de l'Histoire de la Science et de la Danse. Bien que les deux principaux campus soient situés à Norman et Oklahoma City, des programmes affiliés sont mis en place pour élargir l'accès aux étudiants dans l'Est de l'Oklahoma. Les programmes de Tulsa sont les suivants : médecine, pharmacie, soins, santé publique et études en arts libéraux. Oklahoma est classé dans le top 10 en matière de "Collèges publiques" par la Princeton Review. Les étudiants viennent de tous les 50 États américains et de plus de 100 pays.

À partir de l'automne 2007, le campus Norman avait environ 20 000 étudiants dont 6 500 étudiants de troisième cycle. Après la saison du championnat national de football des Sooners, l'Université a connu une hausse des candidatures dans les collèges et dans la liste des admis. Les rentrées de 1999 et 2000 ont vu une augmentation de 1,3% du nombre d'étudiants par rapport aux années précédentes, tandis que la rentrée de l'année 2001 a vu une augmentation de 4,8% avec 2000 infrastructures.



Fig. 7: Installations sportives regroupées sur le campus de Norman

Les Grandes Ecoles, le Collège d'art et des Sciences, comprend 37% des étudiants de l'Université d'Oklahoma (OU). La deuxième école, The Price College of Business s'inscrit 14%, suivie par le College of Engineering, avec 11% et le Collège de l'éducation et le Gaylord Collège de journalisme et de communication de masse, avec environ 6% du corps étudiant. Les petites écoles comprennent les collèges de l'architecture et des sciences atmosphériques et géographiques, la Terre et de l'énergie, de la famille Weitzenhoffer Collège des Beaux-Arts, et la Faculté de droit.

D'autre part, la ville de Norman est organisée autour d'un gigantesque campus divisé en trois sections : campus nord, campus principal, et campus sud. Ces campus sont connectés grâce à un service de bus gratuit pour les propriétaires d'une carte étudiant ou du personnel/faculté. Une navette gratuite permet aux étudiants de se déplacer depuis le Centre « Lloyd Noble » vers le campus principal ou le campus sud en 5-10 minutes. De plus le sport est très présent sur le campus principal, puisque nous pouvons trouver beaucoup d'emplacements réservés à cette activité comme l'Oklahoma Memorial Stadium. Celui-ci peut accueillir 82.112 personnes et représente le 15^{ème} plus grand stade universitaire des États-Unis et accueille l'équipe des Sooners (équipe locale). Le Centre « Barry Switzer » est situé à côté de ce grand stade : c'est un musée historique consacré aux succès de l'athlétisme de l'Oklahoma, ainsi qu'un centre de formation pour les athlètes de l'Oklahoma.

L'unité de recherche de l'Université d'Oklahoma se situe dans la partie nord de Norman et comprend l'aéroport « Max Westheimer » de l'Université de l'Oklahoma, le centre des opérations radar, l'ancien laboratoire national d'étude des orages, l'unité de recherche et de formation OKDHS, le laboratoire ITS de l'Université d'Oklahoma, et le centre informatique et technologique Merrick. Cette partie du campus est fréquentée par les étudiants du département aviation.

Au sud des logements étudiants, se trouve la route de Timberdell, approximativement à la limite sud de l'université. Au sud de cette route, on peut trouver des appartements appartenant à l'université, des complexes sportifs ainsi que l'école de Droit qui, ouverte en 2002, a récemment hérité d'une bibliothèque de qualité. Cette zone comprend également de nombreux complexes sportifs dont le « L. Dale Mitchell Park Baseball », le « Softball OU Field », ou encore le « Lloyd Noble Center » (pour le basket-ball).



Fig. 8 : Le Lloyd Noble Center

3. Le National Weather Center



Fig. 9 : Le National Weather Center de nuit et La Sphère Météo

Le National Weather Center (Centre National de Météorologie) est le lieu stratégique pour étudier les phénomènes météorologiques violents car il est situé dans l'Etat d'Oklahoma, au cœur de l'allée des tornades. Celui-ci est situé au sud du campus à côté du Centre de Recherche Stephenson. C'est un impressionnant bâtiment qui a ouvert ses portes en 2006 et où un grand nombre d'organisations travaillent ensemble en partenariat, afin de comprendre et d'améliorer les connaissances dans l'Atmosphère de la Terre. En outre, les personnes travaillant dans ce bâtiment cherchent à améliorer les analyses, les observations et les systèmes de prévision et d'expertise dans le climat local/régional, de modélisation numérique, de l'hydrologie ou de la météorologie radar. Les informations fournies ici contribuent à réduire la perte de vies et de biens face aux risques météorologiques. 650 employés, enseignants, chercheurs et étudiants travaillent dans ce bâtiment. C'est la maison du Collège des Sciences Géographiques et de l'Atmosphère de l'université, comprise entre le département de Géographie et de l'École de la Météorologie, qui est la plus importante de la nation puisqu'elle est classée n° 1 en matière de recherche pour les phénomènes météorologiques violents.

De plus, c'est le lieu où se trouve le Storm Prediction Center ou « SPC » (Centre de Prévision des Orages) qui émet les alertes météorologiques comme les prévisions convectives ou encore les zones à risque pour les orages violents. Le SPC fait parti du National Weather Service (Service National Météorologique). On peut trouver au rez-de-chaussée des techniciens qui réparent et calibrent les capteurs météorologiques comme les anémomètres par exemple. Enfin, on peut ajouter l'Oklahoma Climatological Survey dont je vais vous faire part dans la prochaine partie.

4. L'Oklahoma Climatological Survey et Logiciels utilisés

L'Oklahoma Climatological Survey ou « OCS » (Service d'Etudes de la Climatologie de l'Oklahoma) a été créé en 1980 pour fournir des services climatologiques à la population de l'Oklahoma, conduire des recherches sur les impacts du climat sur les activités humaines, et sert d'appui pour l'Etat Climatologique. L'OCS conserve un grand nombre d'informations climatologiques en exploitant les données du réseau Oklahoma Mesonet et, plus récemment, Micronet pour Oklahoma City. De plus, l'OCS de l'Oklahoma accueille une grande variété d'actions éducatives et des projets de recherche scientifique. En effet, un grand projet se déroulera en Croatie, où des techniciens du National Weather Center mettront en place un grand réseau de stations météo comme le réseau Oklahoma Mesonet. L'OCS est une unité de recherche du Collège des Sciences Géographiques et de l'Atmosphère à l'Université de l'Oklahoma avec plusieurs catégories de personnes. En effet, nous trouvons les personnes en relation avec l'Oklahoma Mesonet qui renseignent sur le climat, la technologie, la sensibilisation au grand public, l'administration et la recherche. Le directeur de l'OCS est le Docteur Ken C. Crawford et mes maîtres de stages sont Jeffrey Basara, qui est le directeur de la recherche, et Brad Illston son associé.

Je vais maintenant vous présenter les deux logiciels que j'ai utilisés durant mon stage :

WeatherScope



Fig. 10 : Logo du logiciel WeatherScope

Ce logiciel a été développé par l'OCS et nous permet d'observer un grand nombre de données météorologiques, en particulier dans l'État d'Oklahoma, toutes les 5 minutes, grâce à l'Oklahoma Mesonet (un vaste réseau météorologique dans l'Oklahoma). En effet, depuis le 1er Janvier 1994, ce système a recueilli près de 4 milliards de données. En outre, l'Oklahoma Micronet a été développé l'année dernière pour Oklahoma City, avec 40 stations (36 sur les feux de circulation et 4 sites appartenant à l'Oklahoma Mesonet). Nous pouvons observer d'autres données météorologiques dans tous les États-Unis, mais ces données sont mises à jour toutes les heures.

Grâce à ce logiciel, on peut voir en temps réel l'ensemble des paramètres météorologiques comme la température de l'air, la pression, le point de rosée, la direction du vent, les rafales de vent ainsi que les précipitations en utilisant un radar Doppler. En outre, ce logiciel conserve un grand nombre de données passées. C'est pourquoi, nous pouvons observer les phénomènes météorologiques violents au cours de l'année 1999 où se déroula le tornado outbreak en Oklahoma ou encore les supercellules du 13 Mai 2009 (ci-dessous). En effet, ce logiciel est un bon moyen de savoir comment et pourquoi des supercellules ainsi que des tornades se sont produites ce jour là grâce aux données météorologiques.

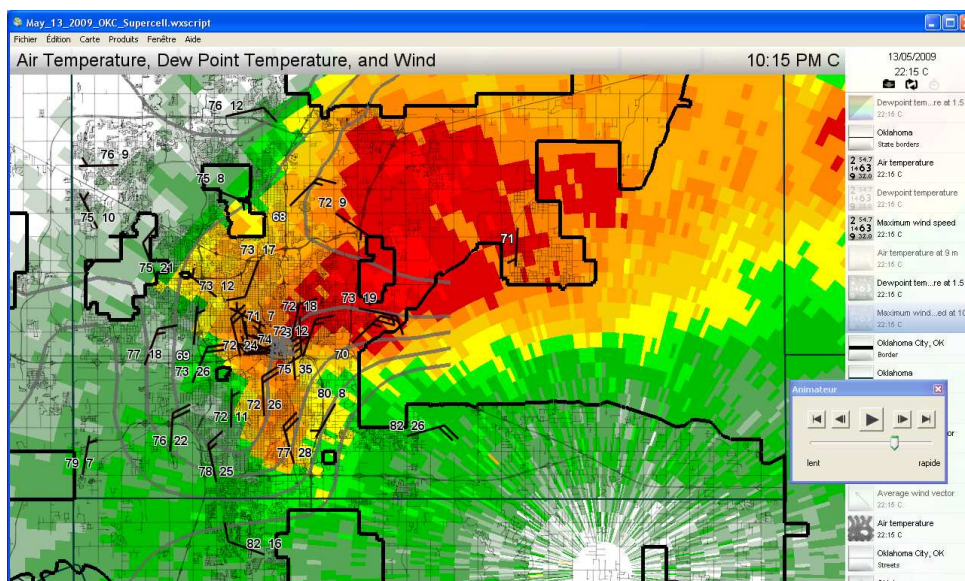


Fig. 11 : Le logiciel WeatherScope en fonctionnement

Radar First

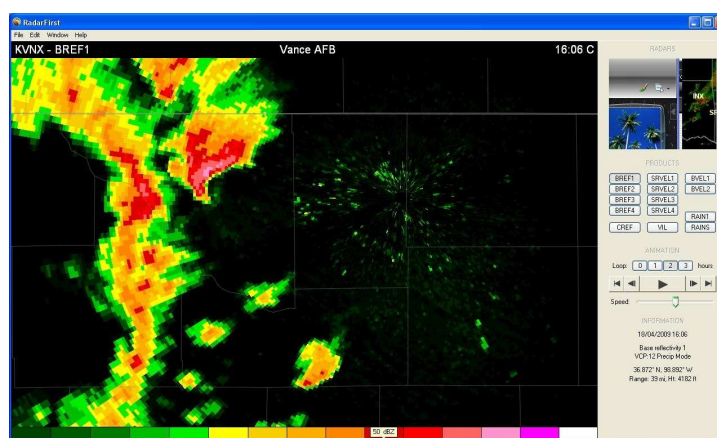


Fig. 12 : Logiciel Radar First en fonctionnement nous montrant une supercellule devant une ligne de grains.

Ce logiciel nous permet de voir la force des précipitations (faibles ou fortes pluies) en dBZ grâce à la réflectivité du radar. En effet, le radar, émetteur, envoie des ondes dans plusieurs directions. Lorsque ces ondes (sinus) rencontrent des précipitations, qui sont ici les récepteurs, celles-ci reviennent en direction du radar. Plus l'écho est fort, plus les précipitations sont importantes. En effet, la force de l'écho détermine la force des précipitations. La fonction CREF est très intéressante car on peut observer la trajectoire des cellules, le pourcentage de la grêle et la taille des grêlons au sein des nuages. En outre, on peut également observer le type d'écho, tels que le TVS (« Tornado Vortex Signature » ou « Signature Tornadique de Rotation ») ou MESO (Mésocyclone) qui permettent de distinguer une potentielle supercellule pouvant produire des tornades. En effet, nous pouvons voir un autre type de radar, nommé "Storm Relative Velocity" (Vitesse Relative des Orages) qui nous permet d'observer le cisaillement du vent. Ce radar détecte deux directions du vent : contraire au radar et un autre dans la même direction du radar. Nous pouvons distinguer ces orientations grâce à des couleurs (par exemple la couleur orange pour une direction, le vert pour une autre). Ensuite, nous avons des échelles pour mesurer la vitesse du vent et détecter les mésocyclones. (*Annexe A*). Enfin, nous pouvons réaliser des boucles jusqu'à 3 heures.

5. Expérience personnelle et travaux

La première journée a été très fatigante avec beaucoup de problèmes. En effet, mon vol Atlanta-Oklahoma City a été annulé en raison des conditions météorologiques (vents violents et tornades). J'ai été en stand by pour un autre vol, mais celui-ci était complet, j'ai donc dû attendre quelques heures. Enfin, après 8 heures d'attente, j'ai pris un vol et j'ai rencontré une dame qui m'a bien aidé. En effet, elle m'a amené à Norman avec sa voiture et m'a trouvé un hôtel. En outre, je n'ai pas dormi pendant 28 heures. Cette journée a été la journée la plus longue de ma vie... Après cela, j'ai trouvé le campus, rempli de nombreux papiers puis obtenu mon OU ID (carte magnétique) avant de m'installer dans mon appartement avec trois autres colocataires (un coréen et deux américains).

Le premier mois a été difficile car tout était nouveau pour moi. Pendant les week-ends, j'ai visité le campus et j'ai rencontré beaucoup de personnes : toujours des américains mais jamais de français. C'est pourquoi, cela m'a donné l'occasion d'améliorer mon anglais en parlant à ces personnes. Au cours du premier week-end, je suis allé à la « Foire Médiévale » qui est un événement majeur avec de nombreuses démonstrations liées au Moyen-Age. En outre, lorsque des orages arrivaient et touchaient la ville de Norman, j'ai pris de très belles photos d'éclairs. Les américains vivant sur le campus ont voulu savoir comment mon appareil fonctionnait. Je leur ai donc expliqué et j'ai partagé ma passion avec eux pour la météorologie avec ces gens. Parfois, quand la météo a coopéré, nous avons chassé avec Jeff dans l'Oklahoma, le Texas et le Kansas. La première chasse restera longtemps dans mon esprit : une partie de mon rêve a été réalisée ce jour-là en observant une incroyable supercellule et des tubas, mais pas de tornades ! Sur le campus, les garçons et en particulier les filles ont été très accueillants et chaleureux avec moi.

La Fête de la Science dans le zoo de la ville d'Oklahoma City a été vraiment un bon moment mais la météo ce jour-là était un peu trop chaude pour moi (85 ° F soit 30°C, pour une fin avril). Au cours de cette journée, Jeff, Brad et moi-même ont mis en place un stand pour présenter l'Oklahoma Mesonet, le réseau Micronet grâce à des cartes. J'ai expliqué aux gens ce réseau lorsque Jeff était occupé. De plus, j'ai fait quelques tampons météo sur les mains des enfants, qui étaient très nombreux ce jour là. Malheureusement, nous avons perdu notre tente en raison d'une forte rafale.

Pendant un week-end, Brad m'a présenté son ami, Danny, qui est un chasseur de tornades travaillant pour la Discovery Channel. Ce fut un très bon moment car j'ai pu voir un bon exemple d'un appareil pas très cher, qu'il avait construit pour étudier les tornades, comme "Dorothy" dans le film Twister. Je me souviendrai toute ma vie de ce dimanche 26 avril, lors du dernier week-end d'avril, où des tornades se sont produites dans l'ouest de l'Oklahoma, exactement au même endroit où nous avons chassé la veille. J'étais vraiment frustré ce jour là avec seulement des orages forts à Norman produisant de fortes pluies, des vents forts, mais toujours pas de tornades.

Grâce à Brad, j'ai eu l'occasion d'assister à ses cours de météorologie. C'était vraiment intéressant, car ses cours parlaient de supercellules, des alertes, des tornades donc en relation avec le sujet de mon stage. Un jour, Danny et son ami chasseur de tornades "Aaron", a présenté un thème en relation avec la chasse aux tornades : l'organisation des chasses, les dangers possibles. Tous ces cours, ces chasses aux tornades ont augmenté ma passion pour la météorologie, surtout les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les orages, les tornades et supercellules.

Après cela, j'ai quitté deux fois Norman pour le Nord-Est de l'Oklahoma, et plus précisément Tar Creek, dans le but de réparer des stations météorologiques avec Jeff tandis que Brad suivait et vérifiait notre opération au National Weather Center. Nous avons testé des stations météo avec un ordinateur portable pour recueillir des données et tenté de comprendre pourquoi certaines stations météorologiques ne fonctionnaient pas. En effet, la plupart des stations météorologiques fonctionnaient, mais deux

comportaient quelques problèmes. L'une d'entre elles était vraiment endommagée, avec des fourmis et les frelons étaient à l'intérieur l'enregistreur de données qui ne fonctionnait donc plus. C'est pourquoi, il nous a fallu démonter la station météo et la mettre dans le pick-up et l'amener jusqu'à Norman. Un problème a été réglé sur une station météo puisqu'il fallait juste changer la batterie. Au cours de ces jours dans le Nord-Est de l'Oklahoma, j'ai eu l'occasion d'observer les dégâts de la tornade EF4 qui a dévasté une ville à côté de Miami.

Le début du plus grand projet de recherche en matière de tornades « Vortex 2 » fut un temps fort. En effet, la journée consacrée aux médias a été vraiment impressionnante au National Weather Center, où beaucoup de personnes, telles que les personnes impliquées dans Vortex 2 et les journalistes, étaient présents. Tous les voitures équipées pour les chasses aux tornades, les radars doppler du projet Vortex 2 et les spécialistes étaient sur le parking du National Weather Center afin d'expliquer le fonctionnement de tous ces dispositifs. En effet, ce projet nous permettra de mieux comprendre la structure et le mécanisme d'une tornade.

En outre, une journée a été vraiment impressionnante : la cérémonie de remise des prix pour les étudiants diplômés dans le grand stade du campus. Tout faisait penser aux films américains avec l'hymne national et l'ensemble des étudiants qui portaient cette fameuse toque noire. Le spectacle pris fin avec un joli feu d'artifice dans une ambiance joyeuse et chaleureuse. De plus, j'ai eu l'occasion de rencontrer le président de l'Université, très amical, et pris une photo avec lui.

La plupart du temps, après le travail, j'ai passé mon temps à la salle de sport, qui est une immense salle où l'on peut pratiquer de nombreux sports tels que le basket-ball, le volley-ball ou encore le ping-pong. En outre, on peut citer un impressionnant complexe où nous pouvons faire de la musculation. De plus, lorsque la météo était au beau fixe avec soleil et chaleur j'ai profité de la piscine et du jacuzzi à Traditions Square West.

Mais j'ai appris deux choses: les américains ne sont vraiment pas fan de mayonnaise, et on peut comparer l'eau en France au coca cola ici !

II. RADIOSONDAGES

1. Introduction

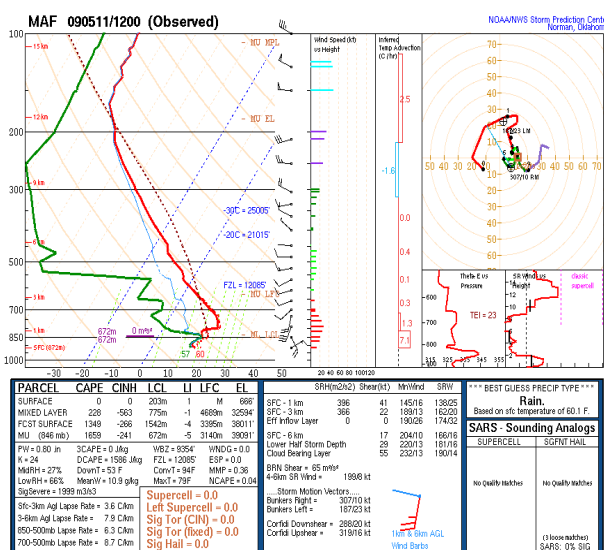


Fig. 13 : Exemple de radiosondage



Fig. 14 : un ballon sonde

Les techniciens météo et les prévisionnistes envoient des ballons sondes dans la troposphère. Grâce à cette expérience, nous obtenons des radiosondages qui constituent un outil météo très complet. On peut avoir accès à beaucoup d'informations dans la troposphère et juste au dessus de la tropopause (limite entre troposphère et stratosphère). J'expliquerai tous ces paramètres que l'on peut trouver dans un radiosondage comme l'hodographe, les vents, les courbes d'états, la CAPE, le CINH...

2. L'hodographe et les vents

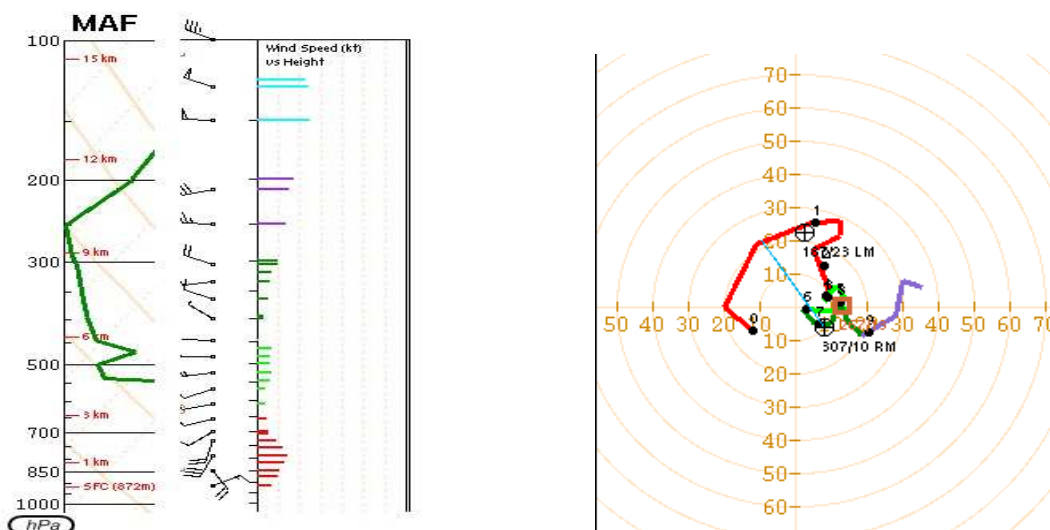


Fig. 15 : Vitesse et direction du vent en fonction de l'altitude avec l'hodographe correspondant à droite

L'image sur la gauche nous permet de voir les caractéristiques du vent avec sa direction et sa vitesse, l'altitude en hPa et la correspondance en mètres. Les barbules nous permettent de mesurer la vitesse du vent en nœuds. En effet, nous devons ajouter chaque drapeau et barres pour le calcul de la vitesse du vent comme dans l'exemple ci-dessous :

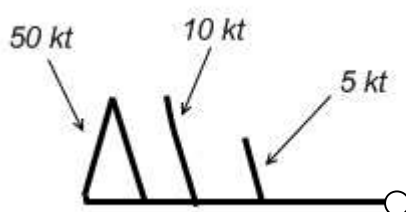


Fig. 16 : Exemple d'une barbule

Un drapeau = 50 nœuds ou 93 km/h
Une grande barre = 10 nœuds ou 18,5 km/h
Une petite barre = 5 nœuds ou 9,3 km/h

Dans l'exemple ci-dessus, nous avons un vent de $50+10+5 = 65$ nœuds soit environ 120km/h en provenance de l'Ouest.

D'autre part, l'image de droite est un hodographe. C'est un très bon outil et un autre moyen de voir la direction et la vitesse du vent à toutes les altitudes (tous les 0,5 km). Grâce à cette partie du radiosondage, on peut voir rapidement si nous avons un cisaillement directionnel et de vitesse. Les deux

échelles (0-70) permettent de mesurer la vitesse du vent en nœuds. Par exemple, le premier point (0-rouge) nous montre une vitesse de 10 nœuds.

Le code couleur nous montre des couches de 3 km d'épaisseur composées de lignes de couleurs (comme en rouge ci-dessous) à partir de la surface. Il est en directe relation avec l'image de gauche qui nous montre la barbole, présentant vitesse et direction du vent, en fonction de l'altitude.

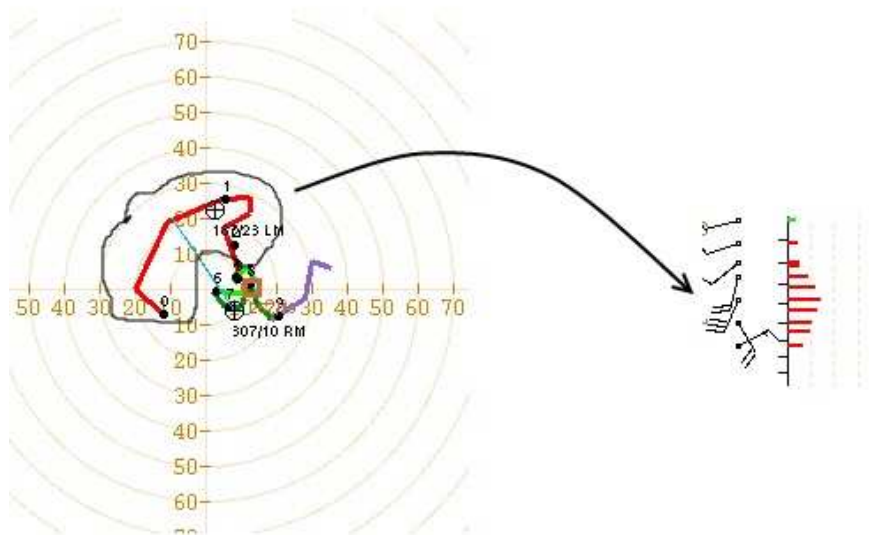


Fig. 17 : Exemple d'un hodographe avec la correspondance des vents (direction et vitesse) grâce au code couleur

De plus, l'hodographe est le meilleur outil pour observer un cisaillement de vitesse et de direction. En effet, la figure 18 nous montre comment mesurer la direction et la vitesse du vent. Il faut partir du centre de l'hodographe puis aller à un point choisi. On obtient ainsi un vecteur qui n'est autre que la direction de notre vent. La pointe de notre vecteur correspond lui à la vitesse, en nœuds, de notre vent : il suffit juste de lire cette valeur grâce aux échelles à notre disposition. Dans l'exemple ci-dessous, le vecteur en haut de l'image est orienté Sud-Ouest Nord-Est. Dans l'exemple ci-dessous, le vecteur en haut de l'image est orientée Sud-Ouest. La pointe du vecteur atteint la ligne des 50 nœuds, ainsi nous obtenons au final un vent de Sud-Ouest de 50 nœuds.

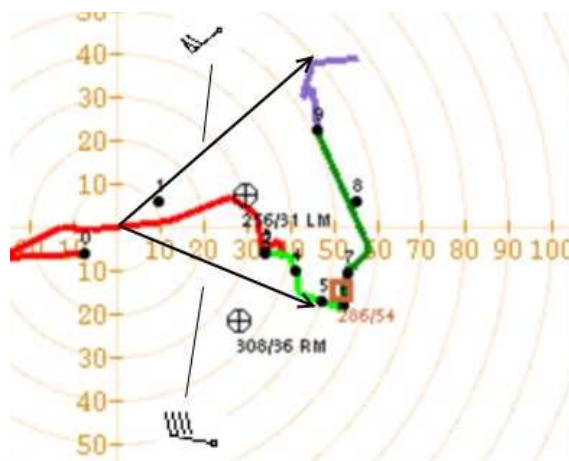


Fig. 18 : Comment mesurer la vitesse et la direction du vent avec un hodographe

Enfin, un hodographe courbé est un très bon élément pour avoir des supercellules car il représente un fort cisaillement directionnel et de vitesse du vent.

3. Paramètres météorologiques basiques

- **PW**: ce paramètre représente toute l'eau condensée dans la partie basse du radiosondage ($< 400\text{hPa}$) en pouces sachant qu'un pouce est égal à 25,4mm.
- **La tropopause** : c'est le niveau de l'atmosphère qui sépare la troposphère de la stratosphère. On peut facilement le reconnaître avec la déviation, vers la droite, de la courbe de la température de l'air ambiant comme dans l'exemple ci-dessous.

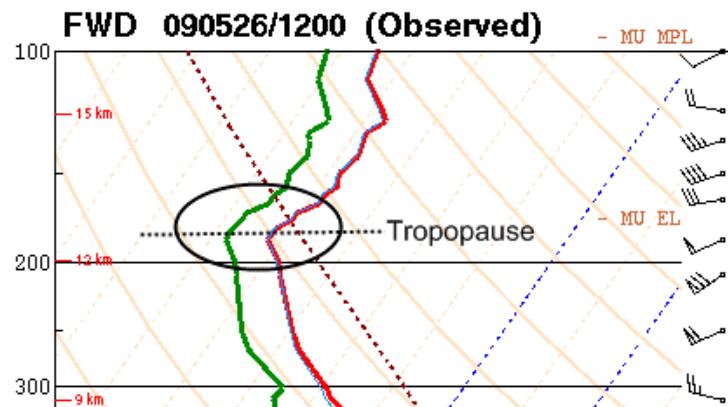


Fig. 19 : Un exemple de tropopause dans un radiosondage

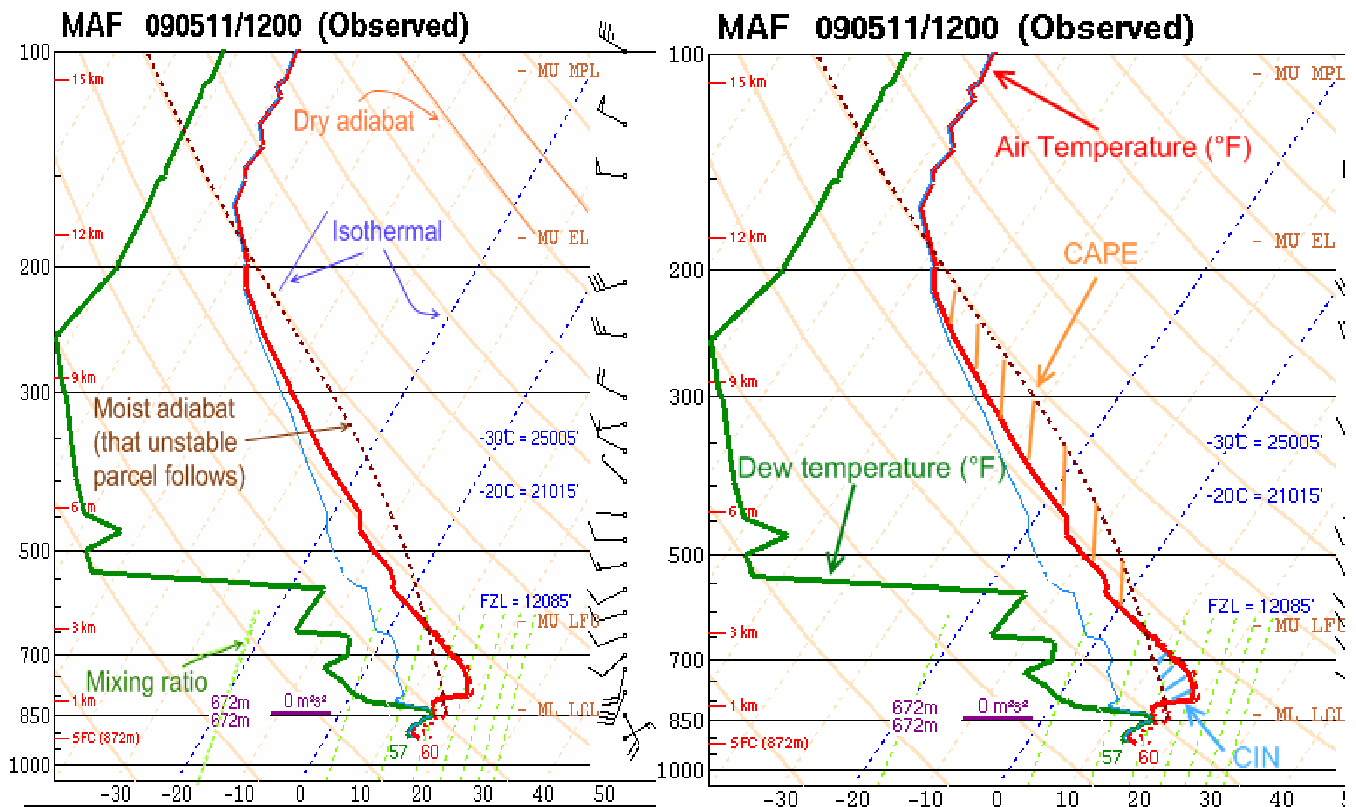


Fig. 20 : Description des radiosondages

Les radiosondages représentent deux courbes d'états : la courbe d'état de la température de l'air (en rouge) et la courbe de la température du point de rosée (en vert) et en degrés Celsius. Lorsque ces deux courbes sont juxtaposées, cela signifie que notre air est saturé d'où une humidité égale à 100%. C'est donc dans cette couche de la troposphère que l'on trouvera des nuages. Dans l'exemple ci-dessus (figure 20), les nuages sont présents entre la surface (872m) et 1km environ. Au contraire, quand ces deux courbes sont éloignées, on rencontre de l'air sec d'où une humidité inférieure à 100%.

4. Paramètres des phénomènes météo violents

On peut découvrir d'autre paramètres comme le LCL, l'EL, le LFC ou encore la CAPE et la CINH qui permettent de comprendre où et comment les nuages se forment. De plus, ces paramètres nous informent sur l'instabilité donc la probabilité de phénomènes météorologiques violents.

Les courbes ci-dessous permettent d'observer la stabilité de l'environnement dans certaines parties de la troposphère : stable, instable ou conditionnellement instable. Nous avons besoin de connaître et situer la courbe de température (en rouge dans l'exemple ci-dessous à droite) par rapport aux adiabatiques. Plusieurs cas sont possibles, par exemple, si notre courbe de température est entre l'adiabatique sèche et humide (comme dans l'exemple ci-dessous à droite), nous sommes dans un environnement conditionnellement instable. En outre, si notre courbe de température est situé à gauche de l'adiabatique sèche, nous sommes en présence d'un environnement instable.

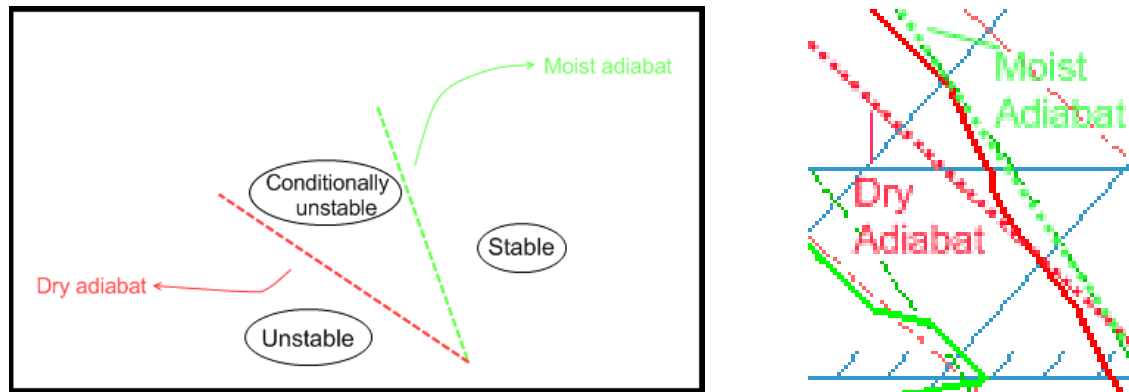


Fig. 21 : Explication du type d'environnement que l'on peut rencontrer avec un exemple concret à droite

- **LCL** ("**Lifted Condensation Layer**" en anglais) ou « **Niveau de Condensation** » en français, nous montre l'altitude de la base des nuages. En effet, c'est le niveau où notre parcelle soulevée devient saturée d'où une humidité relative de 100%.

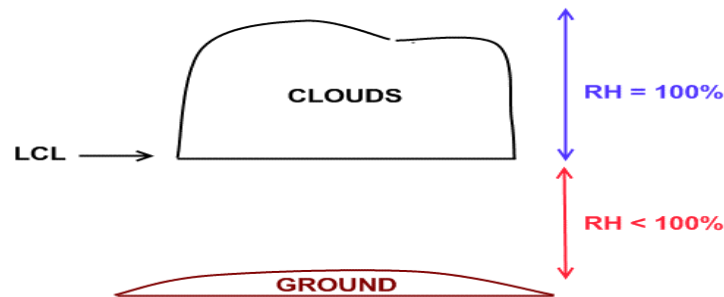


Fig. 22 : Schéma montrant le niveau de condensation

En outre, pour calculer l'humidité relative, nous avons besoin de connaître la masse d'eau dans un kg d'air (rapport de mélange) dans une couche précise de la troposphère. C'est pourquoi, il nous faut trouver le rapport de mélange de la température de l'air (noté « W_s ») et le rapport de mélange pour la température du point de rosée (« W »).

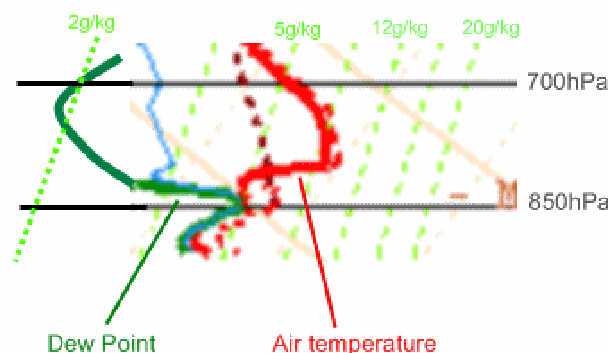


Fig. 23 : Image montrant le moyen de calculer l'humidité relative

Dans cet exemple, nous avons $W_s = 5\text{g/kg}$ et $W = 2\text{g/kg}$ pour la couche à 700hPa d'où une humidité relative :

$$RH = W/W_s = 0,4 \text{ ou } 40\%$$

La couche à 850hPa est saturée ($W=W_s$) ce qui signifie que l'humidité relative est égale à 100%. Ainsi, nous trouverons des nuages dans cette couche de la troposphère.

- **LFC** ("Level of Free Convection" en anglais) ou «Niveau de Convection Libre» en français, est le dernier niveau où notre parcelle instable devient bouillante ou plus chaude que la température de l'air ambiant sur le même niveau. Le LFC représente la partie basse de la couche contenant la CAPE.

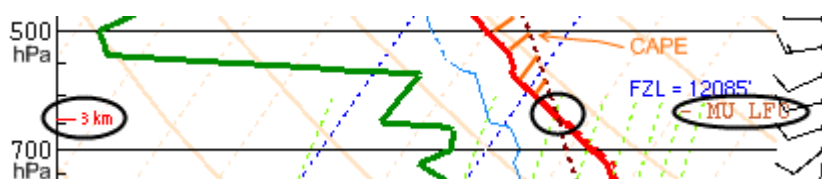


Fig. 24 : Dans l'exemple ci-dessus, le LFC est proche de 3km.

- **EL** ("Equilibrium Level") ou « Niveau d'équilibre », est le niveau où notre parcelle instable est égale à la température de l'air ambiant. Il représente la partie haute de la couche contenant la CAPE. De plus, c'est un bon élément pour calculer l'altitude du sommet des nuages. On peut vérifier et comparer cet élément avec les images satellites.

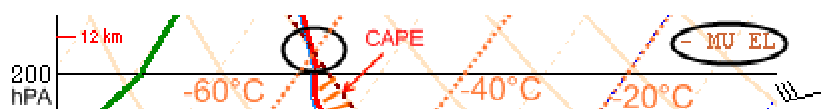


Fig. 25 : Dans l'exemple ci-dessus, nous pouvons faire le lien entre l'EL, grâce au radiosondage, qui nous montre une température de -60°C et l'image satellite qui confirme bien cette température aux sommets des nuages (-60°C aussi). (Annexe B)

- **CAPE** ("Convective Available Potential Energy") ou "Energie Potentielle de Convection Disponible", est l'aire située entre la courbe de la température de l'air et la courbe (parallèle à la adiabatique humide) suivie par notre parcelle instable (adiabatique saturée), du niveau de condensation au niveau d'équilibre. La CAPE est exprimée en J / kg et est un très bon élément nous signalant les mouvements verticaux d'un orage.

MUCAPE se réfère au soulèvement de notre parcelle la plus instable sous la couche des 300hPa.

DCAPE est la CAPE du courant descendant. Les valeurs supérieures à 1000 J/kg sont associés à un fort potentiel pour de forts courants descendants et donc de fortes rafales produites par l'orage pouvant causer des dégâts.

CAPE (J/KG)	Risques
500 - 1500	Orages faibles
1500 - 2500	Orages modérés /forts. Faible risque pour les tornades.
> 2500	Très forts orages pouvant supporter des tornades

Cependant, nous avons besoin d'autres paramètres dans la prévision des orages. Un seul paramètre comme la CAPE est insuffisant.

- **LI ("Lifted Index") ou "Indice de Soulèvement"** est la différence entre la température de l'air ambiant et celle de la parcelle instable sur la couche 500hPa ($LI = B - A$ sur le schéma ci-dessous). Le LI et la CAPE sont étroitement liées avec une forte CAPE qui est toujours liée à un LI négatif. Les valeurs négatives du LI dénotent des parcelles plus chaudes que les températures à 500hPa et sont donc ainsi instables ou en flottabilité.

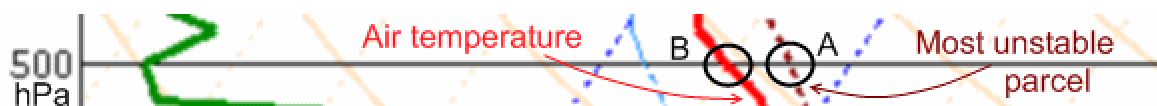


Fig. 26 : Calcul de l'Indice de Soulèvement

Plus le LI est négatif, plus on a de chance d'avoir de forts orages. Mais nous avons aussi besoin d'autres paramètres pour avoir des orages.

- **CINH ou "Inhibition Convective"** est l'intégration de la zone négative en J/kg (allant de la surface au LFC) pour notre parcelle suivant l'adiabatique saturée (bleue sur la figure 20). Cette zone négative représente la quantité d'énergie nécessaire pour qu'une parcelle atteigne le LFC. La zone de CINH est sous la forme d'un couvercle sur le radiosondage. Le moment où ce couvercle se disloque (« breaking cap » en anglais) est le moment où la parcelle a réussi à atteindre le LFC.

On peut faire la comparaison avec de l'eau bouillante dans une casserole et observer 2 cas :

- sans couvercle, la chaleur n'est pas retenue dans la casserole et s'échappe de celle-ci d'où une CINH faible. Dans une situation météo, quelques nuages se développent (type cumulus humilis ou cumulus congestus) mais ce n'est pas suffisant pour avoir de forts développements verticaux avec de forts orages.
- avec un couvercle, la chaleur et l'humidité sont enfermées dans la casserole (forte CINH). Lorsqu'on enlève ce couvercle (donc quand le « couvercle se disloque »), on assiste à une forte bouffée de chaleur qui peut être comparée à un fort développement vertical des nuages. C'est pourquoi, en peu de temps, on peut assister à un rapide et important développement d'orages, avec cette fois, un fort courant ascendant. C'est une très bonne situation pour les supercellules, surtout si les fortes valeurs de CINH sont associées à des fortes valeurs de CAPE.

CINH (J/KG)	Risques
< 15	Cumulus
15-50	Averses / orages épars
50 -150	Forts orages
> 150	Violents orages avec possibilité de tornades

On peut voir en Annexe C un exemple de prévision de la CAPE et de la CINH.

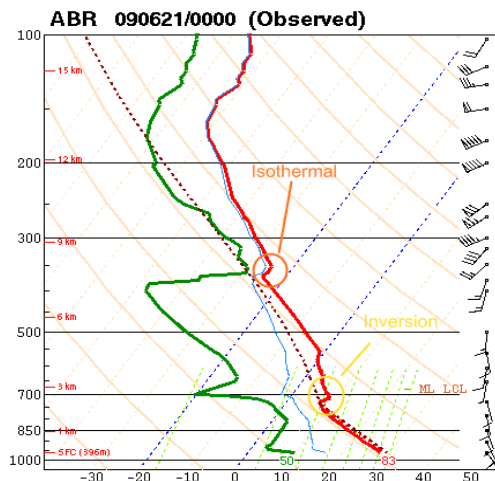


Fig. 27 : Exemple d'un radiosondage montrant des inversions et une isotherme

Le cercle orange montre une isotherme. C'est une couche où la température de l'air est la même. En effet, cette partie de la courbe est parallèle aux autres isothermes comme -20°C ou 0°C (en bleu).

Le cercle jaune montrent une inversion de la température de l'air ambiant. En effet, dans ce cas, la température augmente avec l'altitude. Ceci informe que nous sommes en présence d'une couche stable de la troposphère.

- **TC** : appelé aussi "**Température de Convection**", c'est la température qu'on doit atteindre pour que le couvercle de CINH se disloque. En effet, nous verrons dans la prochaine partie qu'il y a plusieurs moyens pour que le couvercle de CINH se disloque (soulever notre parcelle pour passer la couche d'inversion) comme un front froid ou une ligne sèche. Mais si ces éléments ne sont pas présents, le seul moyen reste la TC. Ainsi, si notre température de l'air ambiant atteint la TC ou est plus élevée que celle-ci, on assistera au dislocation de notre couvercle et donc au développement d'orages.
- D'autres paramètres sont importants dans la prévision des orages et plus précisément, les orages qui peuvent produire des tornades. Je vais en présenter deux parmi tant d'autres, qui sont très importants

- **SRH or SREH ("Storm Relativity Environmental Helicity")** ou plus simplement "**Hélicité Relative**" est une mesure du tourbillon créé par un cisaillement des vitesses dans l'environnement de l'orage. Géométriquement, la SRH est représentée par une aire sur l'hodographe que l'on peut voir en bleu sur le schéma entre des niveaux spécifiés (en général la surface et 3km pour représenter l'alimentation principale de l'orage). L'hélicité correspond à la surface soutendue par la courbe qui marque le changement des vents avec l'altitude. C'est aussi une mesure de la tendance d'une supercellule à tourner.

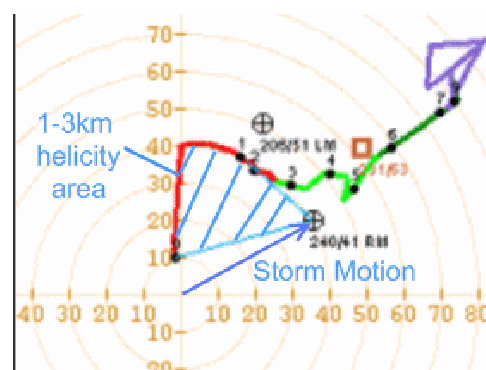


Fig. 28 : Image représentant un hodographe avec la SRH et le vecteur déplacement de l'orage

De plus, le niveau de SRH (entre 0 et 1km) est un très bon moyen pour distinguer les supercellules produisant ou non des tornades. En effet, ce paramètre est un bon moyen d'observer les masses d'air de basses couches qui contribuent à l'alimentation de l'orage (son courant ascendant).

<u>SRH (m²/s²)</u>	<u>Potentiel pour les tornades</u>
150 - 300	Faible
300 - 450	Fort
> 450	Très fort/Virulent

On peut voir un exemple de prévision de SRH dans l'Annexe D

➤ **VGP or "Vorticity Generation Potential"**

VGP = [$S(\text{CAPE})^{1/2}$], où S est le cisaillement moyen (longueur de l'hodographe divisé par la profondeur). Le VGP est un autre moyen expérimental pour prévoir les supercellules produisant les tornades. L'unité de cet index est en m/s² (une accélération). Il est possible d'avoir de fortes valeurs de VGP quand l'hélicité (et l'EH1) est faible. Plus grandes sont les valeurs de VGP plus fortes sont les tornades. Le VGP a été développé par Erik Rasmussen pour une utilisation dans les plaines centrales des USA, mais n'est pas valide pour les autres régions (problèmes encore inconnus).

<u>VGP (m/s²)</u>	<u>Supercellules produisant des tornades</u>
< 0,3	Rare
0,3 - 0,5	Peu probable
0,5 - 0,6	Probable
> 0,6	Probable ou fortement probable

5. Indices caractérisant les phénomènes météo violents

Les radiosondages présentent de nombreux indices relatifs à la prévision des orages, des supercellules et des tornades. Je vais vous en présenter quelques uns :

➤ **KI ou "Indice K"** :

$$K = (850\text{hPa } T - 500 \text{ hPa } T) + 850\text{hPa } T_d - (700\text{hPa } T - 700 \text{ hPa } T_d)$$

Où "Td" est la température du point de rosée et "T" la température de l'air dans une couche précise de la troposphère (500hPa, 850hPa ou 700hPa). C'est un bon indice dans la prévision des risques orageux.

Les valeurs supérieures à 30-40 sont associées aux orages tandis que les valeurs plus petites ne sont pas communes pour les orages.

➤ **Enhanced Stretching Potential (ESP) ou "Amélioration du Potentiel d'Etirement" :**

Ce paramètre identifie clairement l'emplacement des zones de flottabilité dans les basses couches ainsi que les grandes différences de températures. Celles-ci peuvent être favorables à un étirement du tourbillon en basses couches d'où un potentiel à tornades. L'ESP se définit comme suit :

$$ESP = (0-3 \text{ km MLCAPE} / 50 \text{ J kg}^{-1}) * ((\text{Différence de température } 0-3 \text{ km} - 7.0) / 1.0 \text{ C km}^{-1})$$

où l'ESP est égal à 0 quand les différences de températures entre 0 et 3km sont inférieures à 7°C/km, ou quand le total de la MLCAPE est inférieure à 250 J/kg.

➤ **EHI ("Energy Helicity Index") ou "Indice Energique de l'Hélicité "**

$$EHI = (CAPE \times SRH) / 160\,000$$

EHI	Risques
1,0 - 2,0	Potentiel à supercellules
> 2,0	Forte probabilité de supercellules

Ce paramètre est généralement utilisé dans la prévision des supercellules et des tornades. L'EHI est une équation simple qui combine l'hélicité et l'instabilité en un nombre estimant le potentiel à supercellules. Cependant, là aussi, c'est un des nombreux paramètres utilisés dans la prévision des tornades et nous avons besoin de plus d'outils pour prévoir précisément ces phénomènes.

Exemple d'un radiosondage présentant des caractéristiques supercellulaires

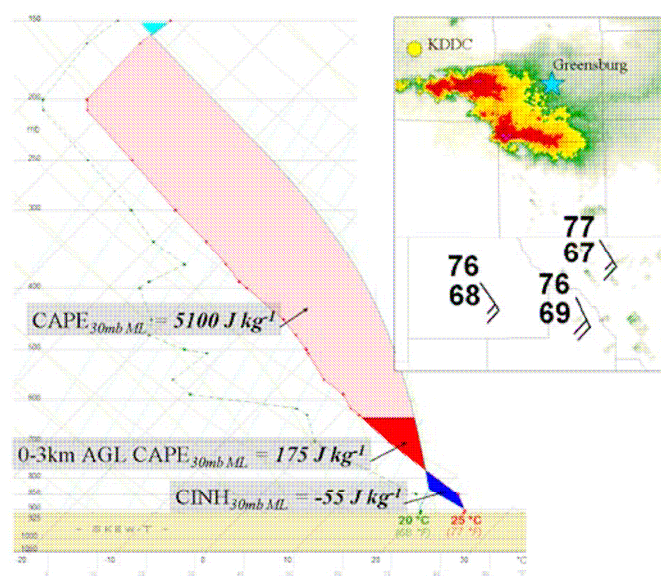


Fig. 29: Radiosondage de Greensburg (Kansas)

L'exemple ci-dessus concerne le cas de Greensburg dans le Kansas où une puissante tornade (EF5) se produit avec une énorme supercellule à la frontière Kansas-Oklahoma. On peut observer des paramètres intéressants comme des valeurs élevées du point de rosée (68°F ou 20°C), de très fortes valeurs de CAPE (5100 J/kg) et une petite zone de CINH (seulement 55 J/kg) suffisamment importante pour avoir des supercellules. De plus, on peut voir sur l'image de droite des vents modérés au sol en provenance du Sud-Est combinés à des valeurs de température du point de rosée très élevées, signifiant un fort apport d'humidité dans les bas niveaux de la troposphère. Evidemment, nous avons besoin d'autres paramètres comme le cisaillement des vents, l'hodographe (courbé ou non) ou encore les valeurs de SRH pour avoir une parfaite description de ce cas.

III. LES SUPERCELLULES

1. Introduction

Chaque jour, de nombreux orages, plus au moins importants, se produisent dans le monde. Les supercellules sont les orages les plus puissants que l'on peut trouver sur la planète. Cependant, pour comprendre le mécanisme d'une supercellule, nous avons besoin de comprendre la formation d'un simple orage.

D'abord, un cumulus humilis puis médiocris se forme dans la basse troposphère (0,5 à 1km). Ces nuages évoluent ensuite dans la troposphère alimentée par la convection et la convergence au sol. Ils évoluent jusqu'au stage de cumulus congestus (forme d'un chou-fleur) proche des 6-7km. Ce dernier continue encore son évolution pour atteindre le stade de cumulonimbus. Celui-ci s'étend très haut jusque dans la tropopause, qui est la limite entre troposphère et stratosphère, avec une altitude moyenne d'environ 10km pour nos latitudes. On reconnaît le cumulonimbus grâce à sa forme en enclume si particulière. Pourquoi cette forme ? A la fin de son ascension, le cumulonimbus ne peut plus s'étendre plus haut dans la troposphère puisqu'il rencontre de l'air très sec mais surtout très stable dans la stratosphère. En effet, le courant ascendant de l'orage ne peut pas plus évoluer et on assiste alors à une zone de divergence commençant au sommet du courant ascendant. C'est pourquoi, le cumulonimbus n'a qu'un seul choix : celui de s'étendre sur sa partie supérieure, d'où la forme de l'enclume. Finalement, on peut voir une petite partie du cumulonimbus, sous la forme d'un dôme, qui est appelé « sommet pénétrant » et qui correspond à la limite/fin de notre courant ascendant.



Fig. 30 : Cumulus humilis > Cumulus congestus > Cumulonimbus

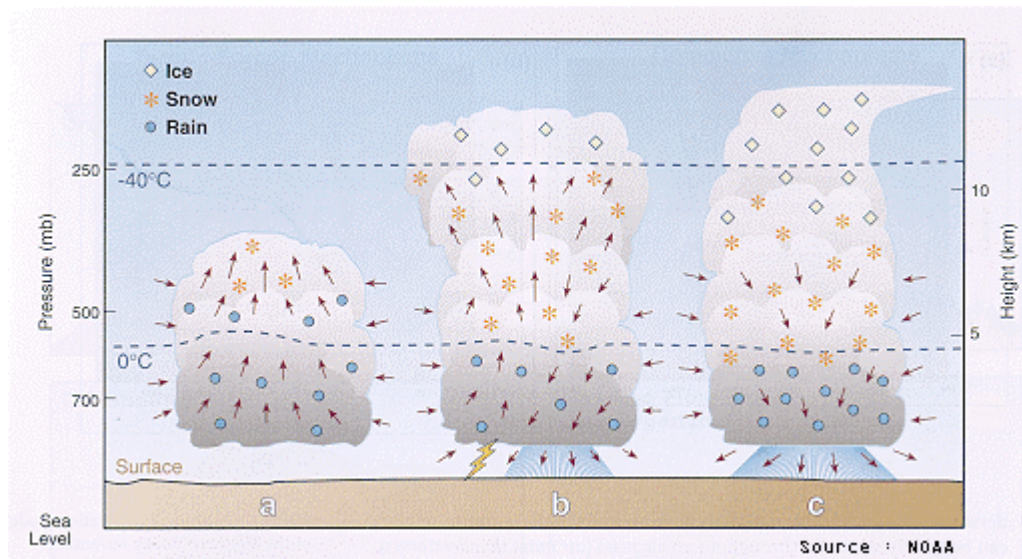


Fig. 31 : Les 3 étapes d'un orage

2. Caractéristiques principales

Les supercellules sont différentes des autres cellules orageuses car celles-ci sont en rotation. Elles présentent un puissant courant ascendant ainsi qu'un mésocyclone. Quelquefois, ces cellules ont l'apparence d'un champignon atomique. Un orage supercellulaire est reconnaissable car ce dernier domine toute une zone et se comporte comme une seule entité plutôt qu'un groupe de cellules. Parfois, les supercellules sont produites à l'avant de lignes de grains (« squall line ») ou proviennent d'un éclatement de deux cellules (« storm splitting »). Les supercellules contiennent une structure cinématique qui est unique et c'est ce qui permet de les identifier et de les classer en 3 catégories principales. En effet, ces catégories sont « Classique » (Browning en 1964), « LP » pour « Low Precipitation » en anglais (Bluestein et Parks en 1983) et « HP » pour « High Precipitation » (Mollet et al. En 1990).

Les caractéristiques principales des supercellules sont leur durée de vie, en moyenne de 4 à 6h avec une largeur de 40-60km mais une importante supercellule peut atteindre les 200km. De plus, elles ont un puissant courant ascendant, un fort cisaillement des vents (de vitesse mais aussi directionnel) et produisent de violents phénomènes météo tels que de gros grêlons, de fortes rafales et des tornades. La vitesse du courant ascendant est la plupart du temps compris entre 45 et 90mph ce qui correspond à 72 et 145 km/h, parfois plus (100mph).

On peut donner les caractéristiques des supercellules basées sur les données des radars : réflectivité et vélocité. En effet, pour classer une cellule en supercellule, nous devons observer plusieurs paramètres. Le premier est que notre orage doit contenir un mésocyclone avec une différence azimutale de la vitesse supérieure à 15 nœuds ou 27,8 km/h au niveau de sa base. On peut observer ce mésocyclone grâce au radar "Storm Relative Velocity" (**Annexe A**). Le second paramètre est que notre orage doit durer 30minutes ou plus. En outre, l'initiation de notre cellule doit produire un écho radar de 40 dBZ. Le troisième paramètre est basé sur la fin de vie du mésocyclone. Enfin, le dernier paramètre (pas tout le temps) montre une déviation de notre cellule de 20 à 30° du flux principal.

On peut donc reconnaître 3 types de supercellules :

- Les supercellules "LP" qui, comme leur nom l'indique, présente peu ou pas de précipitations. Cependant, ce type de supercellule n'est pas un bon producteur de tornades. (*Annexe E*)
- Les supercellules "HP" produisent d'intenses précipitations avec un puissant courant descendant et de gros grêlons (souvent de la taille d'une balle de base ball ou même de la taille d'une balle de tennis). Cependant, celle-ci est très dangereuse puisque la tornade peut être cachée par ces fortes précipitations. On peut la reconnaître grâce à un écho en forme de haricot. Les supercellules HP sont les plus dangereuses par rapport aux autres. (*Annexe F*)
- Les supercellules "Classiques": ce sont les meilleurs supercellules pour produire des tornades. Des informations supplémentaires concernant la structure et le mécanisme de ces supercellules seront données dans la prochaine partie. En outre, le type de précipitations varie en fonction des valeurs des différents paramètres telles que la CAPE, la CINH. (*Annexe G*)

3. La structure des supercellules

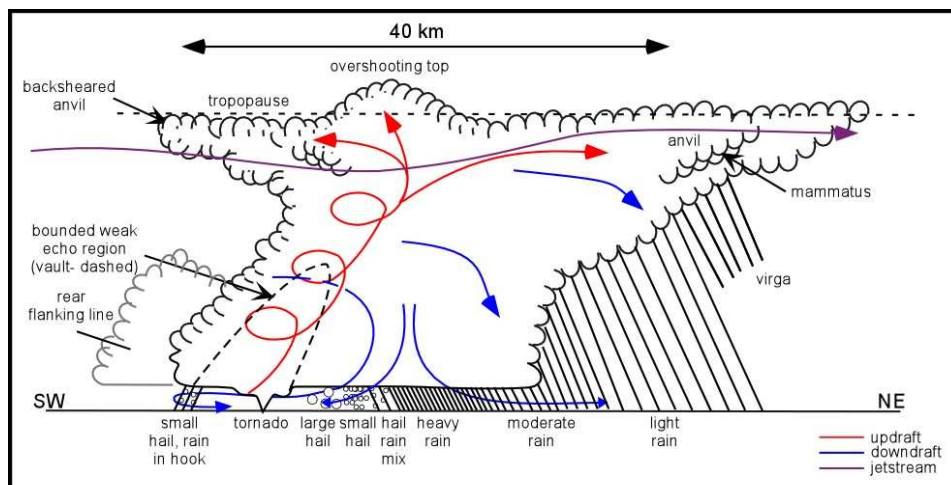


Fig. 32 : une supercellule vue du Sud-Est

Cette image est la représentation d'une supercellule dans les plaines centrales des Etats-Unis. Nous retrouvons la structure d'un cumulonimbus, mais la supercellule est plus développée et beaucoup plus puissante.

- En effet, les flèches rouges représentent un fort courant ascendant rotatif. Celui-ci est le principal acteur de la supercellule puisque c'est l'alimentation de l'orage. Ce courant ascendant est plus puissant dans une supercellule que dans un cumulonimbus basique. Les supercellules évoluent avec un sommet pénétrant tout en haut de la cellule, juste au dessus de la tropopause. Parfois, celui-ci atteint de très hautes altitudes. Par exemple, la supercellule de Greensburg (Kansas), qui a produit une énorme tornade, comportait un puissant courant ascendant qui a poussé le sommet du cumulonimbus à près de 22 kilomètres au dessus du sol! En règle générale, comme je l'ai dit précédemment, le cumulonimbus atteint les 10-12km. Les petites particules du nuage sont transportées par le fort courant ascendant résultant en une base sans pluies. Ces particules sont de petites tailles qui sont détectées par le radar qui se traduisent en un écho BWER.

BWER signifie "Bounded Weak Echo Region" ou "Voûte d'Echos Faibles ». Il apparaît "limité" par le cœur des précipitations élevées à proximité. On peut voir cet écho sur le diagramme (en tirets), et sur la figure 33 qui suit. Il est représenté par un trou dans la zone de faible réflectivité dans la partie Sud de la supercellule et est associé à un fort courant ascendant ainsi qu'une faible réflectivité.

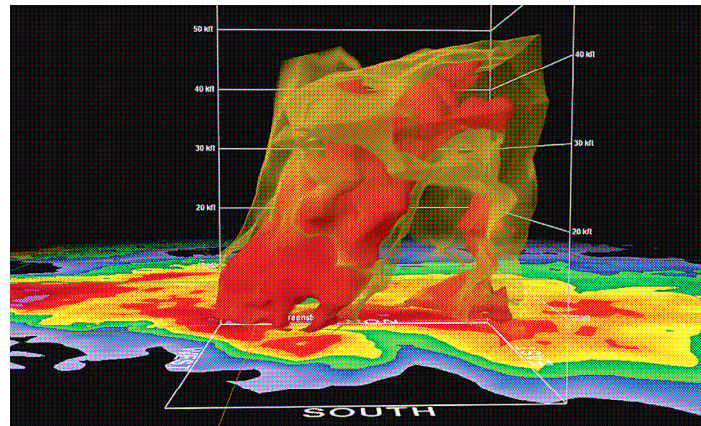


Fig. 33 : Profil vertical d'une supercellule avec son écho BWER

- On peut souvent observer une zone, au niveau du courant ascendant, avec des bases de nuages très basses en relation avec la base sans pluies dont j'ai précédemment fait part. C'est le nuage mur et ce dernier est la plupart du temps en rotation. Des tornades se produisent souvent sous ce nuage mur. L'image suivante nous montre très bien cela :



Fig.34 : Une tornade sous un nuage mur

- Dans une autre partie du schéma (figure 32), on peut observer la ligne convective arrière. C'est une ligne où se développent de nouvelles cellules orageuses le long du front de rafales arrière. En effet, c'est un peu comme une sorte de poupées russes puisque lorsque notre cellule orageuse principale meurt, elle peut être directement remplacée par une cellule de cette ligne convective.



Fig.35 : une ligne d'alimentation

- On peut voir le courant descendant représenté par les flèches bleues (figure 32). Celui-ci produit de la pluie et de grêle, plus ou moins fortes. De plus, ces hydrométéores sont plus fortes proches de la tornade avec souvent des fortes chutes de grêles (> 5cm et parfois plus).

4. Le mécanisme des supercellules

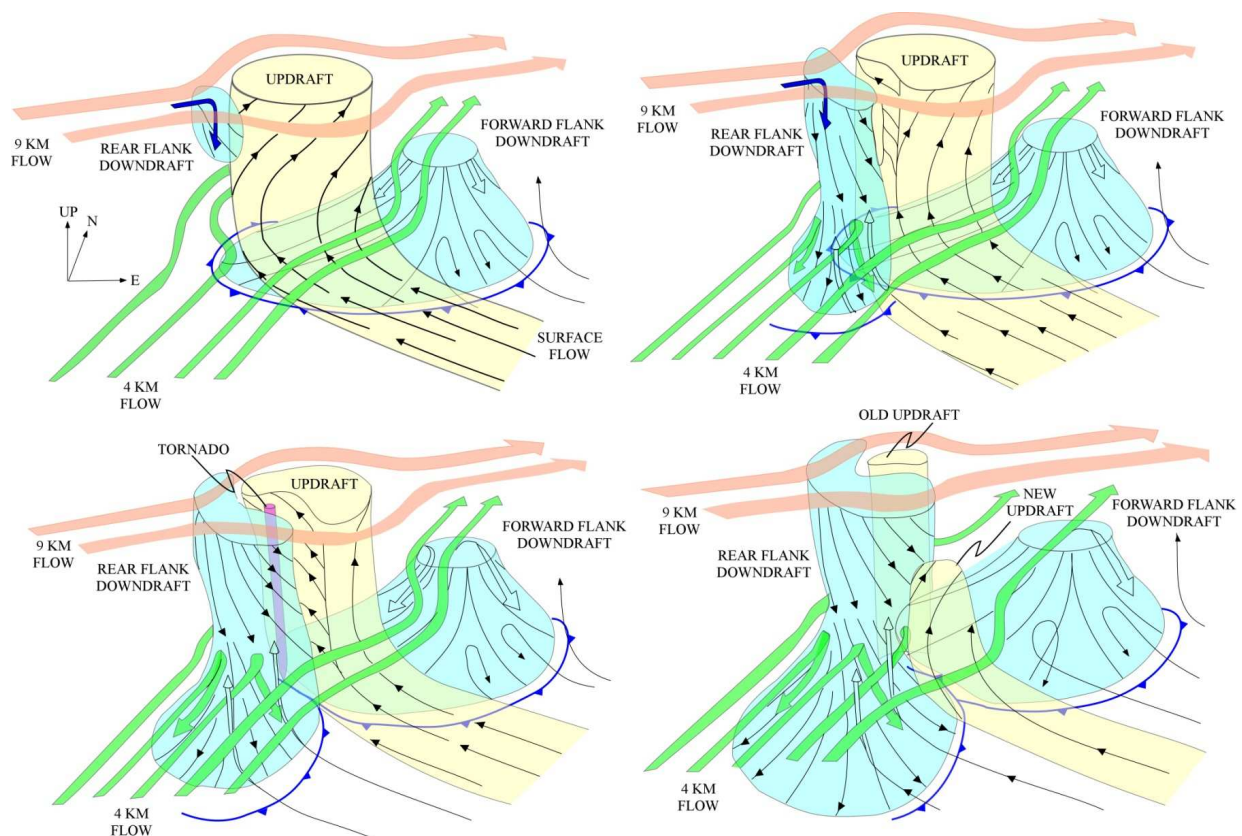


Fig. 36 : Schéma montrant le mécanisme et la vie d'une supercellule

Le mécanisme des supercellules se décomposent en 3 principales étapes :

- En effet, durant la première étape, une cellule sur le côté droit de la ligne d'alimentation arrière développent deux types d'échos radar : un écho pendant à mi-niveau et une région de faible réflectivité. En effet, un fort et persistant courant ascendant se développe et atteint le sommet de la troposphère. Par la suite, ce courant ascendant rencontre un environnement très stable (stratosphère) : nous assistons donc à une forte divergence au sommet de ce courant ascendant d'où un écho en surplomb.
- La deuxième étape est définie quand un écho spécial est détecté. En effet, il s'agit de la Voûte d'Echos Faibles . Celui-ci indique la localisation du courant ascendant et c'est une bonne indication concernant l'augmentation du contenu en eau et la glace autour de celui-ci. En effet, on peut observer à ce moment là le mésocyclone grâce à un radar Doppler. En outre, au cours de cette étape, on peut voir un fort rideau de grêle et on peut souvent observer des tubas/entonnoirs ou parfois des tornades (en violet dans le schéma) au niveau de l'occlusion de l'orage. C'est la rencontre entre le courant ascendant et le courant descendant du flanc arrière de la cellule orageuse.
- La dernière étape est la phase d'effondrement de la cellule. En effet, durant cette étape, nous assistons à la dissipation de notre écho BWER avec une décroissance notable de l'écho en surplomb. De plus, en parallèle, les courants descendants de l'orage prennent de l'ampleur (en extension et en magnitude) tandis que notre courant ascendant décroît pour devenir « un ancien courant ascendant ». Par la suite, celui-ci est remplacé par un nouveau courant ascendant...

5. Ingrédients nécessaires

Quatre principaux ingrédients sont nécessaires pour obtenir une supercellule. En effet, nous devons être en présence d'un environnement très instable avec de fortes valeurs de CAPE ($> 2000 \text{ J/kg}$), de fortes différences de températures ($> 7^\circ\text{C/km}$) où ces dernières sont prises la plupart du temps entre 2 et 4km ou 0 et 500m.

D'autre part, une forte humidité en provenance du Golfe du Mexique est préférable avec de fortes valeurs des points de rosées ($> 60^\circ\text{F}$ ou $15,5^\circ\text{C}$) ainsi qu'une dépression du point de rosée à 850hPa (soit 1500m environ). Un jet de basses couches (LLJ) est aussi nécessaire pour apporter toute cette humidité du Golfe du Mexique. De plus, un cisaillement vertical modéré ou fort est important, surtout sous le niveau de convection libre (LCL), dans la couche 0-1km, qui peut être vue dans un radiosondage.

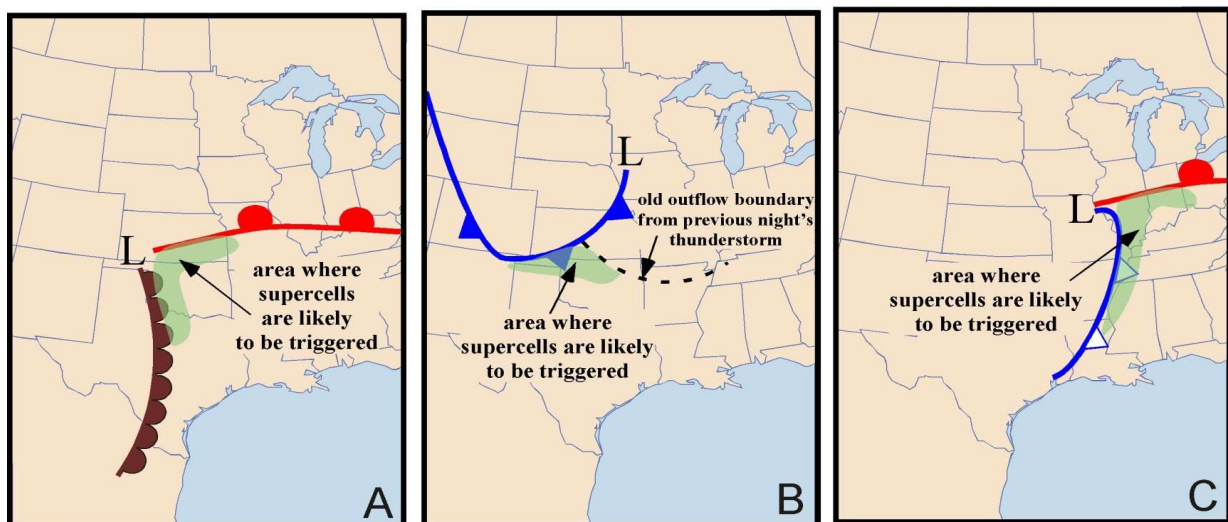


Fig. 37 : Mécanismes de déclenchement

Lorsque nous disposons de tous ces paramètres, nous avons besoin d'un élément pour déclencher la convection comme un front froid (C), une ligne sèche (A) ou encore des limites produites par les flux sortants des anciens orages (B). En effet, nous avons besoin de soulever notre parcelle instable (suivant l'adiabatique saturée) pour disloquer le couvercle de CINH (« breaking cap » en anglais). La vitesse d'un front froid peut aussi être un élément important. En outre, un front froid qui est rapide sera beaucoup plus intéressant qu'un front froid qui est lent et dévitalisé.

Dans le premier cas (front froid rapide), notre parcelle sera soulevée plus facilement que dans le second cas. Si, nos trois éléments déclenchant la convection ne sont pas présents, il nous faut suffisamment de chaleur pour disloquer le couvercle de CINH. En fait, nous devons avoir une température plus grande que la TC (Température de Convection). J'ai expliqué de manière précise ce dernier élément dans la partie « Radiosondages ».

D'autre part, nous avons aussi besoin du courant jet qui permet d'observer les zones susceptibles de déclencher la convection et donc les orages puisque l'on peut clairement identifier les zones de convergences/divergences. En effet, une zone de convergence en altitude (détectée par le courant jet) correspond à une zone de divergence au sol qui est donc très mauvaise pour déclencher la convection. C'est pourquoi, nous avons besoin de la situation inverse avec de la divergence en altitude et donc de la convergence au sol qui permet le développement d'orages avec de forts courants verticaux.

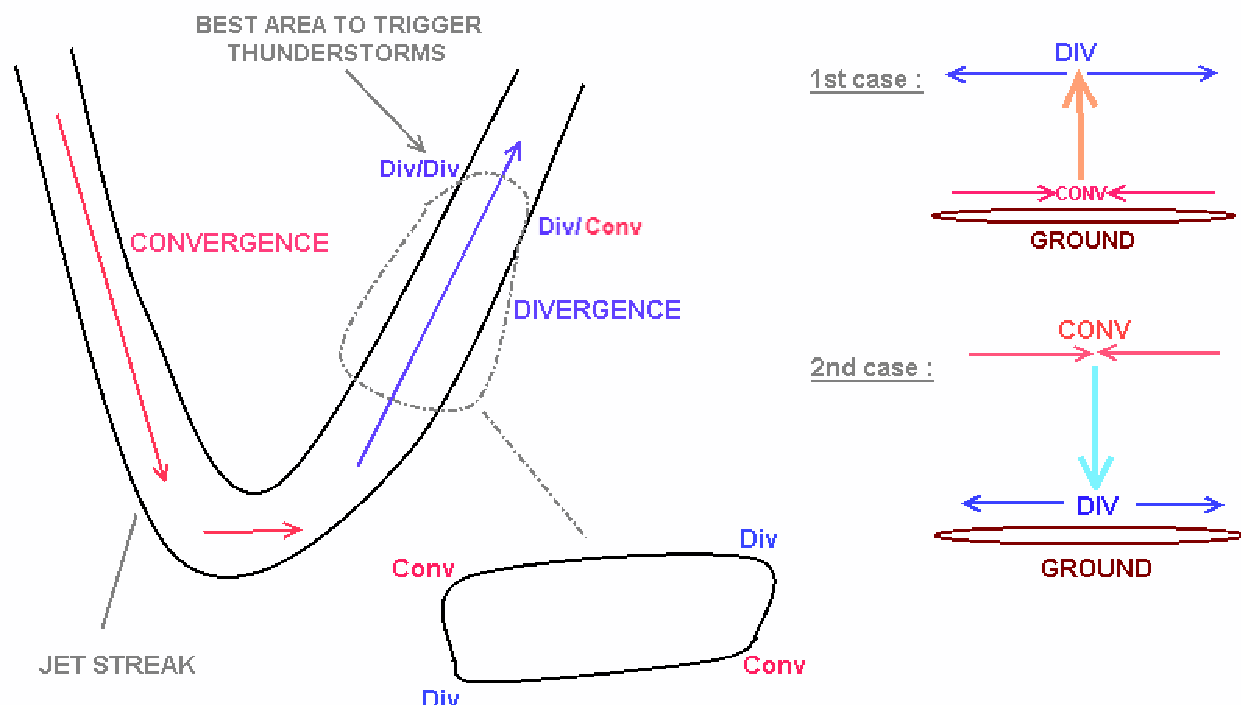


Fig. 38 : Courant jet avec les zones de convergences/divergences et la meilleure partie du jet pour avoir des orages

6. Echos Radars

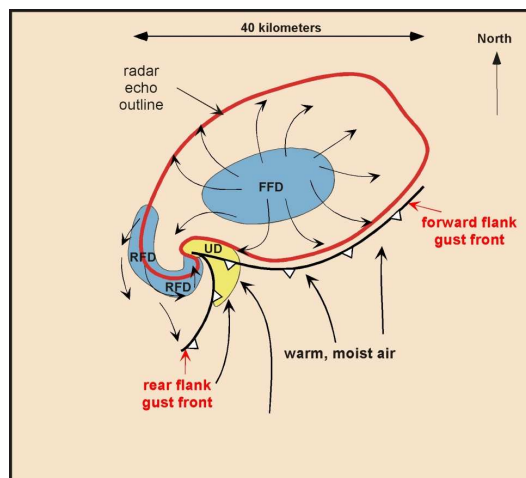


Fig. 39 : Echo radar typique d'une supercellule

Les supercellules ont un écho radar spécifique modélisable et qui peut être distingué grâce au vaste réseau de radars NEXRAD (*Annexe H*) :

- Le courant ascendant noté "UD" sur le schéma (« UD » pour « UpDraft » en anglais). Celui-ci a été décrit précédemment. Un fort courant ascendant rotatif est nécessaire dans le développement d'un mésocyclone et ensuite d'une tornade..
- Le courant descendant de flanc arrière "RFD" (pour "Rear Flank Downdraft" en anglais). Comme son nom l'indique, c'est un courant descendant à l'arrière de la supercellule qui produit un front de rafales (vents forts). Il est identifiable comme une fente claire juste au dessus du nuage mur comme on peut le voir dans l'*Annexe I*.
- Le courant descendant de flanc avant « FFD » (pour « Forward Flank Downdraft»). Ce dernier produit aussi un front de rafales. Il couvre une large zone de la supercellule comme on peut le voir dans le schéma ci-dessus.
- L'écho en crochet (ou "Hook echo") se situe dans la même zone que le RFD/UD. C'est dans cette partie de la supercellule que l'on trouve les tornades. Les fronts de rafales du flanc avant et arrière se rejoignent pour former une occlusion. Cette interaction entre le fort courant ascendant rotatif et la courant descendant de flanc arrière produit le mésocyclone.

Les précipitations sont plus fortes proches de l'écho en crochet avec de la grêle ou de la grosse grêle ; tandis que, nous trouvons des précipitations pluvieuses plus au moins fortes entre le cœur du flanc arrière et l'enclume.

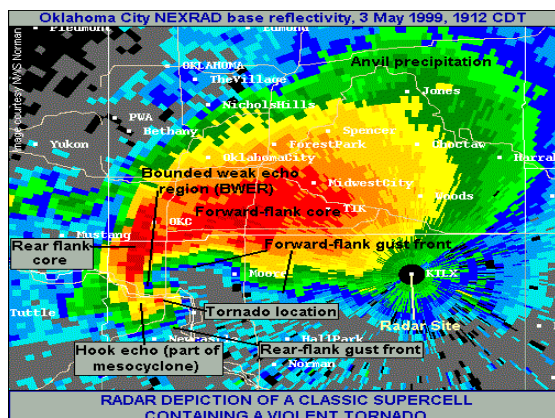
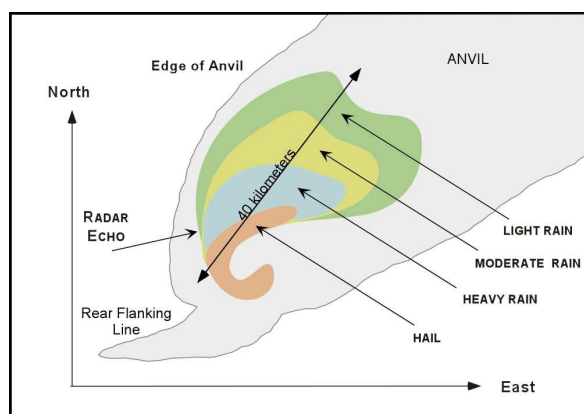


Fig. 40 : D'autres échos radars nous montrant la structure d'une supercellule



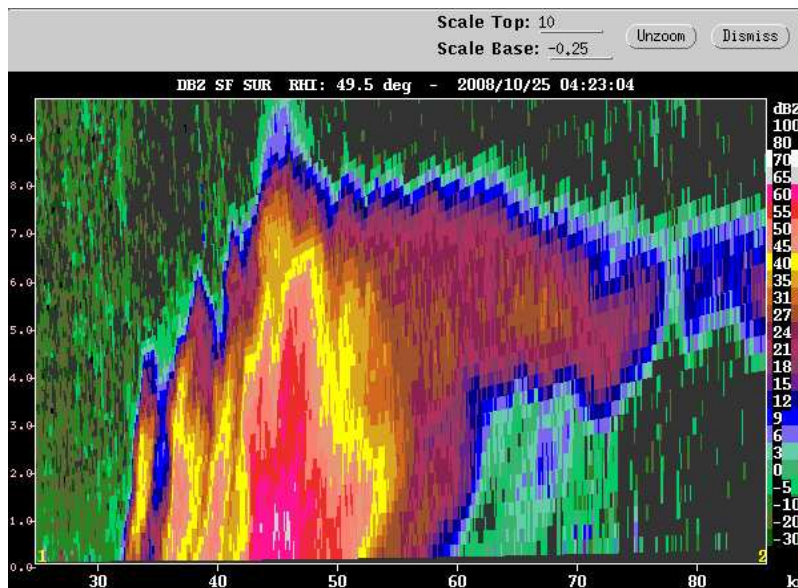


Fig. 41 : Coupe verticale d'une supercellule (réflectivité)

Cette image représente une vue verticale d'une supercellule où l'on peut découvrir 3 échelles :

- L'échelle de gauche : celle-ci représente l'altitude en km (0 à 9 km ici)
- L'échelle de droite : celle-ci nous permet de mesurer l'intensité de la pluie/grêle en dBZ grâce au réseau de radars NEXRAD (*Annexe H*). En effet, les précipitations ont des réflectivités différentes. Par exemple, de faibles pluies renverront un faible écho (10-20 dBZ) tandis que de la grêle ou de fortes pluies renverront un fort écho (50dBZ ou plus).
- L'échelle du bas : celle-ci permet de nous montrer la largeur de la cellule en km. Dans cet exemple, la supercellule a une largeur d'environ 40km.

Nous pouvons observer, comme nous l'avons vu dans la structure d'une supercellule, de la grêle et de fortes pluies de 43km à 60km (échelle du bas) et de faibles pluies entre 60 et 75km sous les rebords en altitude de l'enclume. De plus, le sommet pénétrant est identifiable à environ 46km et atteint une altitude légèrement supérieure aux 9km. Enfin, on peut voir la ligne d'alimentation (trois cellules) à l'arrière de la supercellule entre 32 et 40km signifiant une longue alimentation pour l'orage principal.

7. Cas de supercellules

• Cas du 13 mai 2009 - Centre de l'Oklahoma :

Nous pouvons observer un vrai cas d'école avec l'écho en crochet, le FFD, le RFD, l'UD et le mésocyclone montrés par le radar doppler. De fortes valeurs du point de rosées ont été observées avec en moyenne 68°F (66-70°F) soit 20°C. D'autre part, nous pouvons noter une forte rotation avec des vents tournants tels des vents de Nord-Est pour le FFD, de Nord-Ouest pour le RFD et de Sud-Ouest pour l'UD. Près du mésocyclone, nous pouvons observer les vents les plus forts et tournant autour de celui-ci avec des vents de Nord-Est à Nord de 25 nœuds ainsi qu'une rafale à 80km/h . De plus, nous pouvons observer des vents d'Est avant l'arrivée de la supercellule et des vents d'Ouest à l'arrière de celle-ci. Ces orages se sont formés le long de la ligne de convergence (Sud Sud-Ouest avant les orages - Nord-est après) et proche du front froid venant du Nord.

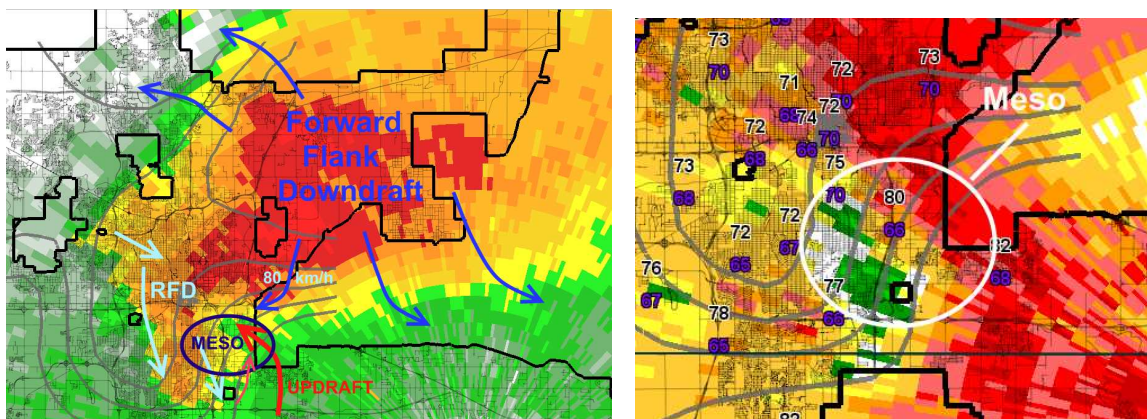


Fig. 42 : Schémas montrant les différentes parties de la structure d'une supercellule ainsi que la localisation du mésocyclone sur l'image de droite.

• Cas du 10 février 2009 :

La supercellule est beaucoup plus imposante que le précédent cas. En effet, l'écho en crochet est très prononcé tout comme l'est le mésocyclone. Nous pouvons observer les caractéristiques principales grâce à la réflectivité du radar, tels que le FFD, le RFD et l'UD. Cependant, les valeurs du point de rosée sont très basses avec seulement 56°F (soit 13,3°C). Nous pouvons apercevoir un très fort gradient de température vers le RFD avec 8°F (soit 4,5°C) de différence sur quelques miles. Le même jour, une forte tornade classée EF4 s'est produite dans le Sud de l'Oklahoma (Lone Grove).

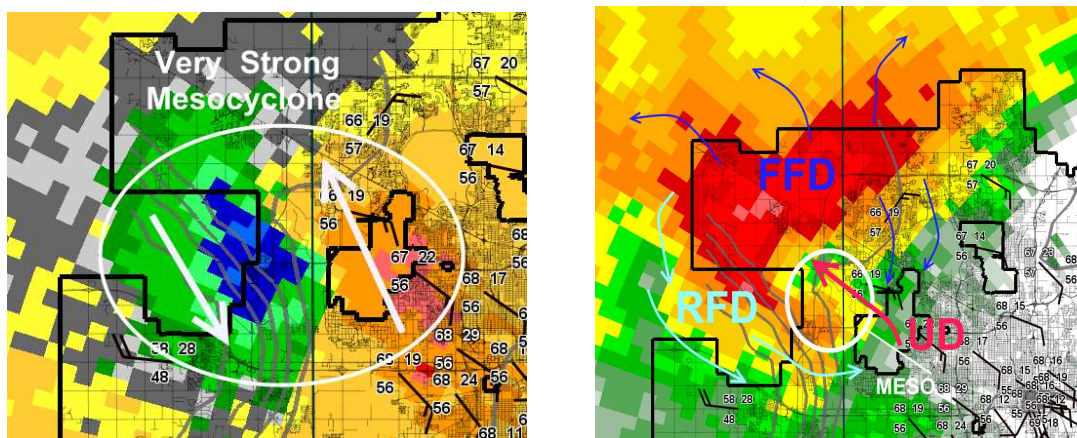


Fig. 43 : Mêmes diagrammes que pour le précédent cas mais pour le cas du 10 février 2009 cette fois

8. Les supercellules en Oklahoma

L'Etat de l'Oklahoma est un endroit stratégique pour étudier les phénomènes météorologiques violents et plus particulièrement les supercellules. En effet, cet Etat des USA est au carrefour de plusieurs masses d'air importantes avec de l'air chaud et humide en provenance du Golfe du Mexique ainsi que de l'air très froid et très sec en provenance des Montagnes Rocheuses. Je vais maintenant vous montrer différentes études réalisées par l'Oklahoma Climatological Survey pendant la période 1994-2003 et vous faire part de ces études concernant les trajectoires, les densités, les initiations et terminaisons des supercellules.

- Les trajectoires des supercellules changent au cours de l'année. On peut observer deux principales trajectoires. La première orientée Sud-Ouest Nord-Est concerne la période allant de Janvier jusqu'à Juin ainsi que la fin de l'année. D'autre part, la seconde trajectoire est orientée du Nord-Ouest vers le Sud-Est pour la période allant de Juin à Septembre.

STATE OF OKLAHOMA - SUPERCCELL TRACKS

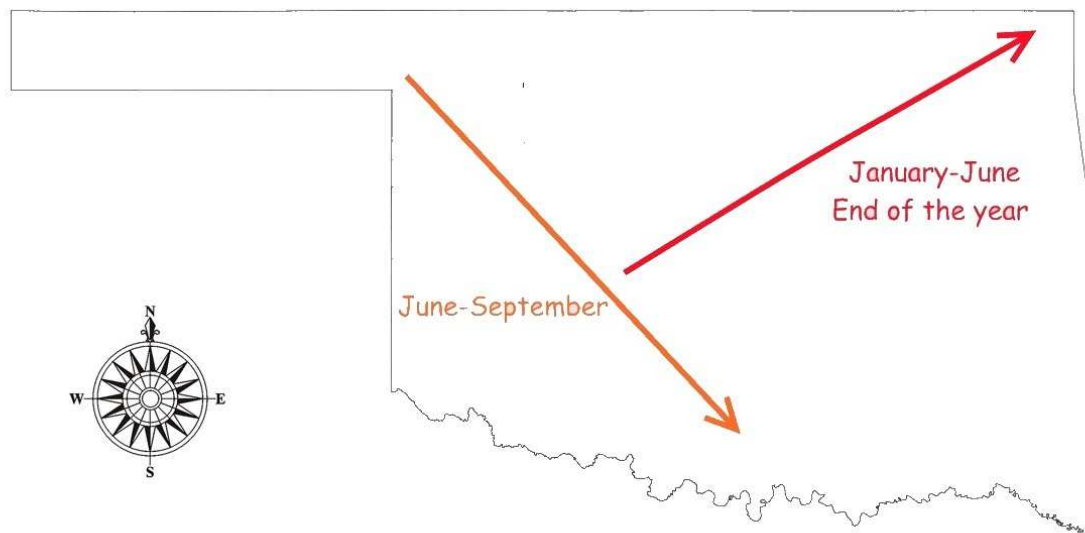


Fig. 44 : Trajectoires des supercellules dans l'Etat d'Oklahoma pour deux principales périodes de l'année

- En outre, 75% des supercellules se produisent d'avril à juin et 25% le reste de l'année. Le mois de mai est le meilleur mois pour observer ces phénomènes puisque celui-ci présente le plus de cas de supercellules. En effet, pendant la période 1994-2003, environ 366 cas de ou 85 jours de supercellules ont été observé pendant ce mois, suivi par avril et juin qui comptent 190 et 145 cas ou encore 50 et 55 jours de supercellules respectivement. Enfin, le nombre moyen total de supercellules qui se produisent à travers l'Oklahoma dans cette période est de 94. D'autre part, cette étude nous révèle une moyenne de 28 jours de supercellules par an.
- Plusieurs régions de l'Oklahoma ont été identifiées pour accueillir le maximum de supercellules : le centre-est, le sud-ouest ainsi que la partie centre-ouest dans le Nord-Est de l'Etat.
- L'initiation des supercellules se produit la plupart du temps entre 20h et 00h UTC soit 15h et 18h heure locale (Oklahoma) tandis que leur fin est commune entre 23h et 3h UTC soit 18h et 22h heure locale.

IV. LES TORNADES

1. Introduction et Cas

Une tornade est, d'après la définition scientifique, une violente colonne d'air en rotation qui s'étend de la base d'un orage (principalement le nuage mur) jusqu'au sol. Les tornades produisent les vents les plus forts sur notre Terre et sont ainsi plus violents que les cyclones. Cependant, elles sont souvent confondues avec les diables de poussière ("dust devil" en anglais), les tornades de front de rafales, les trombes marines ou les trombes terrestres, qui ne sont pas produites par des supercellules mais plutôt par des nuages de type

cumuliforme comme le cumulus congestus ou un simple cumulonimbus. Les tornades sont communément sous la forme d'entonnoirs plus au moins large.

En outre, 75% des tornades dans le monde se produisent aux Etats-Unis, principalement dans l'allée des tornades (Texas, Oklahoma, Kansas, Nebraska). Chaque année, une moyenne de 1000 tornades se produisent sur le sol des USA. En effet, c'est une zone où d'imposantes masses d'air se rencontrent telles que l'air chaud et humide du Golfe du Mexique, l'air chaud et sec des terres du Mexique et l'air froid et sec des Montagnes Rocheuses.

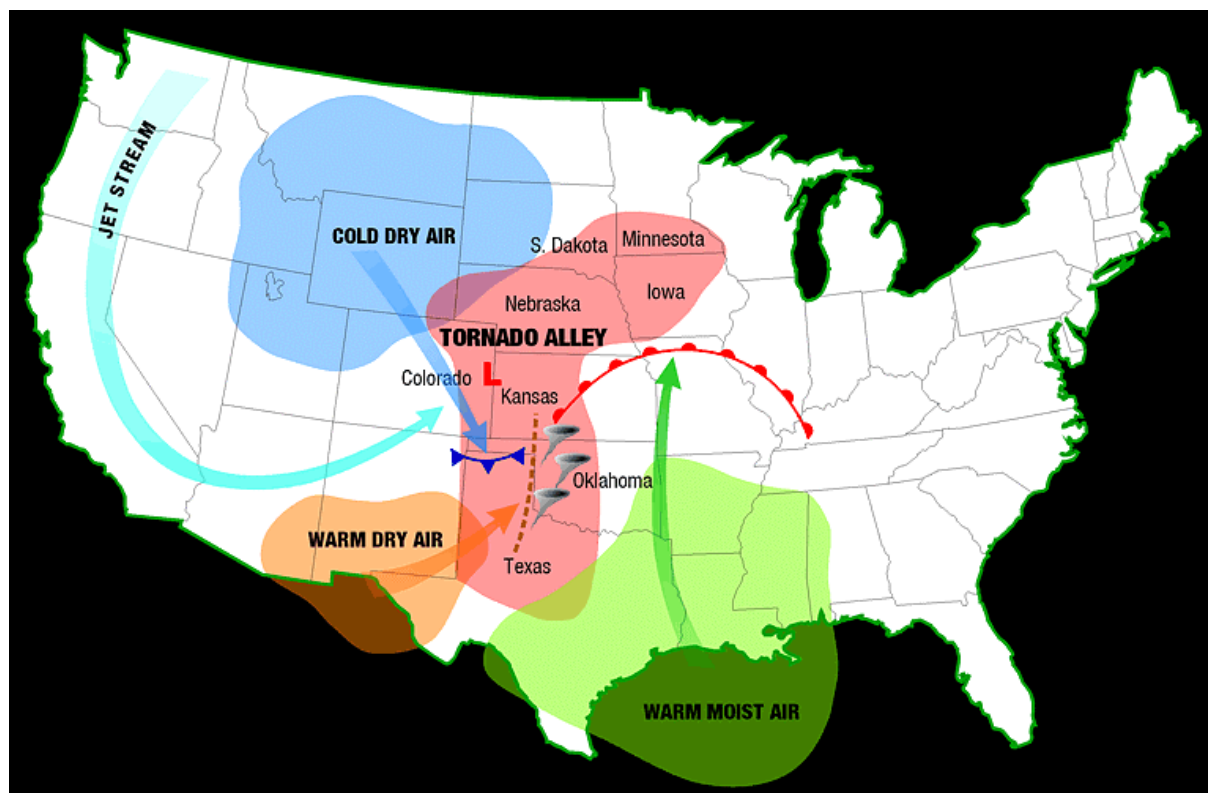


Fig. 45 : L'allée des Tornades aux USA avec une situation synoptique typique pour de violents phénomènes météo et des tornades

Les tornades sont toujours inconnues des météorologistes professionnels. En effet, les prévisionnistes ne peuvent pas prévoir précisément où les tornades se produiront mais ils peuvent informer les gens grâce aux annonces telles que les surveillances des tornades et les alertes aux tornades. Ainsi, les gens peuvent être très bien informés sur les risques météo en temps réel grâce à la radio, la télévision et internet. Cependant, la communauté scientifique aimerait mieux comprendre ces phénomènes. C'est pourquoi, les spécialistes des orages et des tornades ont donné naissance à des projets comme "Thunderstorm Project", « Vortex 1 » ou encore récemment « Vortex 2 » (cette année 2009 et 2010 durant le printemps et la saison des tornades) pour étudier les orages et plus spécialement les supercellules qui produisent ou non des tornades. En effet, de puissants ordinateurs nous donnent de nombreuses données à propos de la structure des supercellules grâce à des simulations en 3 dimensions. Seulement, nous avons besoin d'autres données pour prévoir au mieux ces phénomènes. Malheureusement, le temps n'a pas été propice la plupart du temps ce printemps pour Vortex 2 avec seulement une tornade et peu de bonnes supercellules.

Les tornades se produisent généralement durant le printemps. En effet, le pic de tornades est enregistré durant le mois de mai suivi par avril et juin. Cependant, les tornades peuvent aussi se produire le reste de l'année. En effet, le 10 février 2009, qui n'appartient pas à la meilleure période, est un bon et récent exemple puisqu'une tornade EF4 s'est produite dans le Sud de l'Oklahoma. On peut voir en **Annexe J** le nombre moyen de tornades par an pour 10 000 miles² (soit 16 000 km²) pour les USA.

La plus forte concentration se situe dans l'Allée des Tornades avec une moyenne de 9 tornades pour le Centre Oklahoma, le Nord du Texas ; entre 5 et 7 tornades du Sud-Est Texas jusqu'à l'Iowa South-Dakota.

Pour conclure cette partie, les tornades se produisent principalement entre 16h and 20h mais c'est une moyenne et les tornades peuvent aussi se produire en pleine nuit (le cas de Greensburg par exemple).

2. Mécanisme et Structure

Une tornade est un vortex dont les vents, très forts, tournent dans le sens cyclonique dans l'hémisphère Nord (c'est à dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre), rarement dans le sens cyclonique (seulement 2% des tornades). La pression dans le vortex est très basse comparativement à la pression de l'environnement extérieur.

Beaucoup d'hypothèses sont possibles pour expliquer la formation d'une tornade. C'est pourquoi, de nombreux spécialistes ont développé de grands projets comme Vortex 2 pour comprendre comment et pourquoi les tornades se forment.

Je vais expliquer quelques théories concernant la genèse des tornades et commencer par la théorie en relation avec :

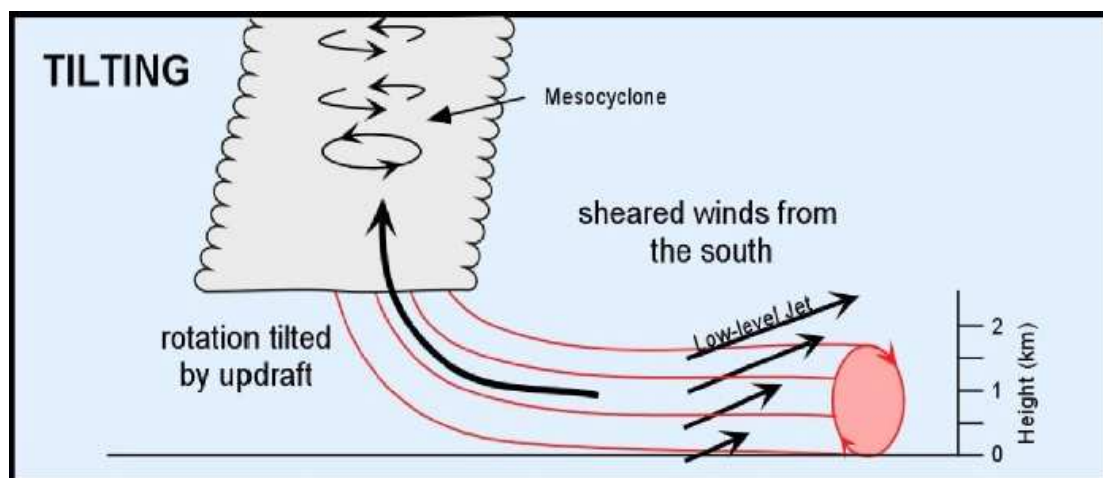


Fig. 46 : La théorie de l'inclinaison

Nous pouvons observer, sur le schéma ci-dessus, le mésocyclone produit par une supercellule. En outre, ce schéma nous montre le jet de basses couches apportant toute l'humidité dans les bas niveaux de la troposphère, comme nous avons pu le voir dans la partie concernant les supercellules. En fait, cette première théorie explique que nous devons avoir un fort cisaillement vertical directionnel et de vitesse avec une rotation des vents du Sud-Est vers l'Ouest (comme nous l'avons vu dans la partie concernant l'hodographe). Ces vents entrent alors en interaction avec le fort courant ascendant qui tend à incliner la rotation de mi-niveau verticalement. En effet, cette circulation est inclinée vers le haut, comme le schéma nous le montre et on peut donc assister à la création d'un mésocyclone avec une rotation prononcée qui peut produire une tornade.

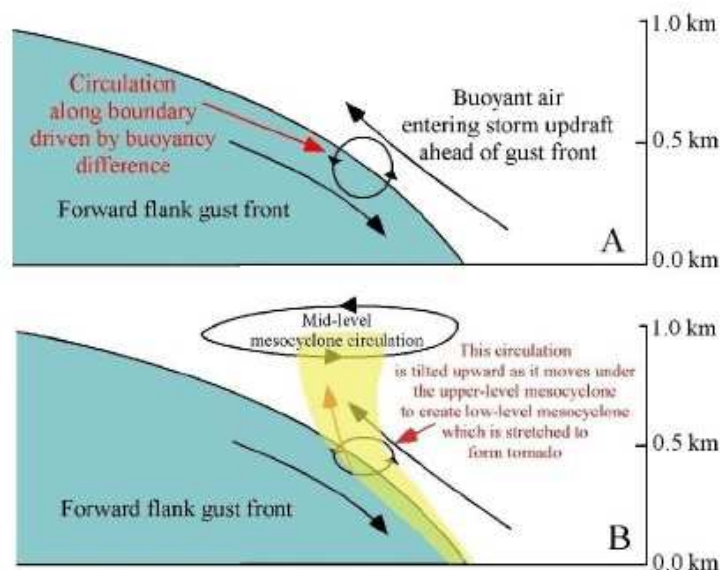


Fig. 47 : Une autre théorie concernant la formation des tornades

Ce schéma ci-dessus nous montre une seconde théorie concernant la formation des tornades, appelée « processus de bas en haut ». C'est un bon élément pour la production de rotation, au sein d'un orage, qui se produit le long du front de rafales (identifiable par un arcus que l'on peut voir dans l'annexe K) produit par un fort orage. En effet, nous assistons à une entrée d'air chaud et humide au niveau du courant ascendant (alimentation de l'orage) et à l'avant du front de rafales tandis que l'air descend vers le sol après le front de rafales. Ceci crée une circulation le long de cette limite générée par la différence de flottabilité. Cette circulation est ensuite inclinée verticalement ce qui permet d'engendrer un mésocyclone dans les basses couches pouvant supporter une tornade.

Par la suite, nous devons parler de l'étirement qui est un élément principal dans la compréhension du développement des tornades. En effet, grâce à la loi suivante : $R1 \cdot V1 = R2 \cdot V2$, où R est le rayon et V la vitesse, nous pouvons dire que le moment angulaire est conservé comme le montre le diagramme ci-dessous :

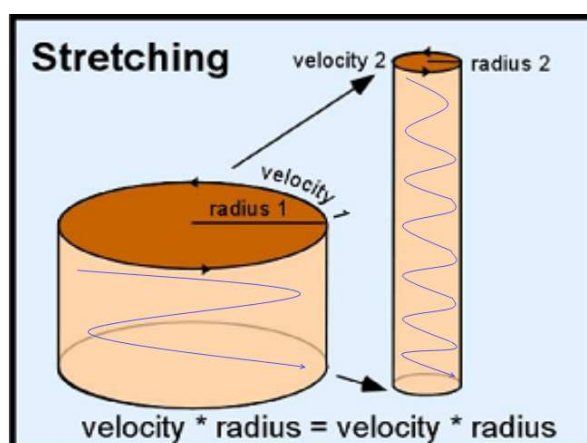


Fig. 48 : Le mécanisme de l'étirement

C'est pourquoi, les courants descendants concentrent la rotation dans un espace de plus en plus petit jusqu'au sol. La rotation est ainsi plus forte car la vitesse des vents augmentent en même temps que le diamètre de la colonne se rétrécit. Ainsi, une tornade peut être formée.

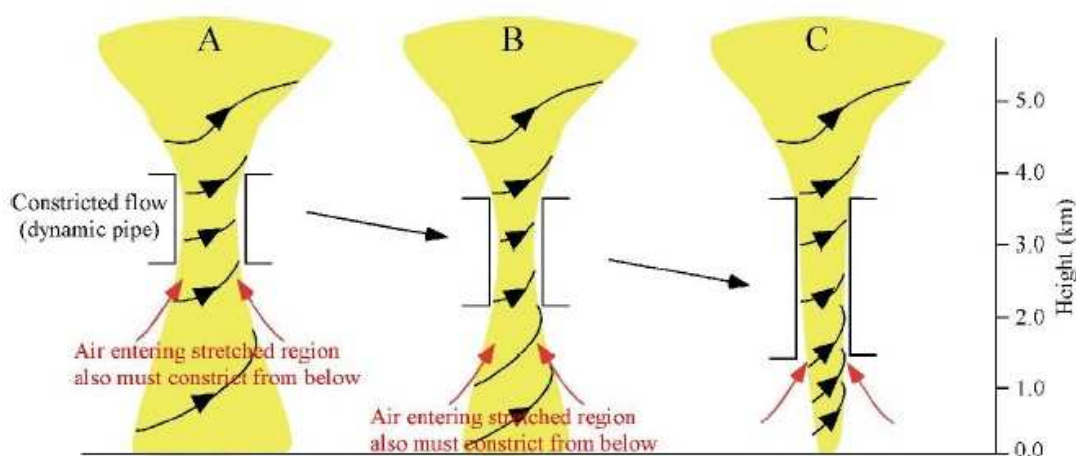


Fig. 49 : Effet de tube dynamique

Nous allons parler de l'effet de tube dynamique appelé aussi "processus de haut en bas" représenté par le schéma du dessus. Les flèches noires nous montre la constriction du flux dû à cet effet de tube dynamique. L'air entrant est progressivement étiré et conscrit par le bas. La constriction du flux du mésocyclone dans les niveaux moyens entraînent une force d'étirement vers le sol. C'est pourquoi, nous pouvons observer un cône cylindrique puis un entonnoir. Nous pouvons voir un bon exemple dans l'annexe L.

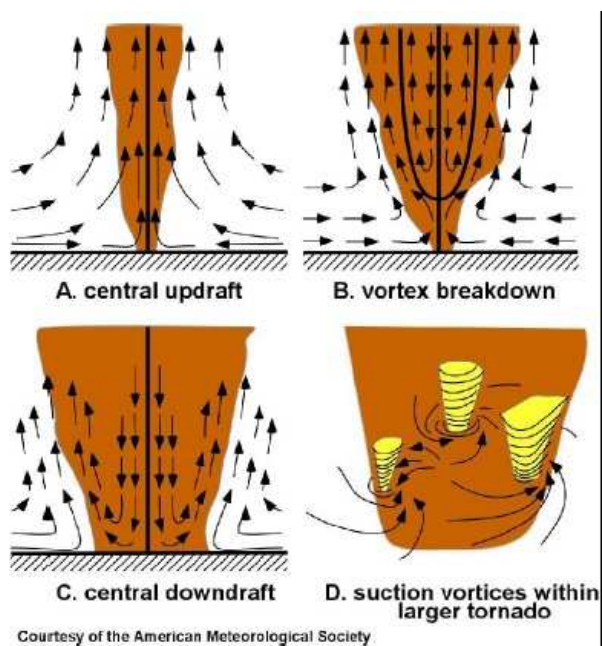


Fig. 50 : La théorie des vortex multiples

L'image ci-dessus représente le vortex avec le sens de déplacement des vents. L'image A nous montre un vortex assez mince avec en son cœur, un fort courant ascendant rotatif. Par la suite, au fur et à mesure que le vortex grossit, nous assistons à la rupture de celui-ci avec un fort courant descendant au milieu. Ce courant descendant descend donc jusqu'au sol pour interagir avec le courant d'air rotatif à l'extérieur (mésocyclone). Ceci produit un ou plusieurs vortex de tailles minces dans un seul gros vortex, d'où le terme de « tornade à vortex multiples ». Quelquefois, on peut voir une petite tornade tournant autour d'une autre beaucoup plus large, ce qui peut être comparé à un satellite tournant autour de la Terre. Cependant, ces schémas ne sont justes que de simples théories et les spécialistes ont besoin de plus amples renseignements sur les tornades.

3. Ingrédients

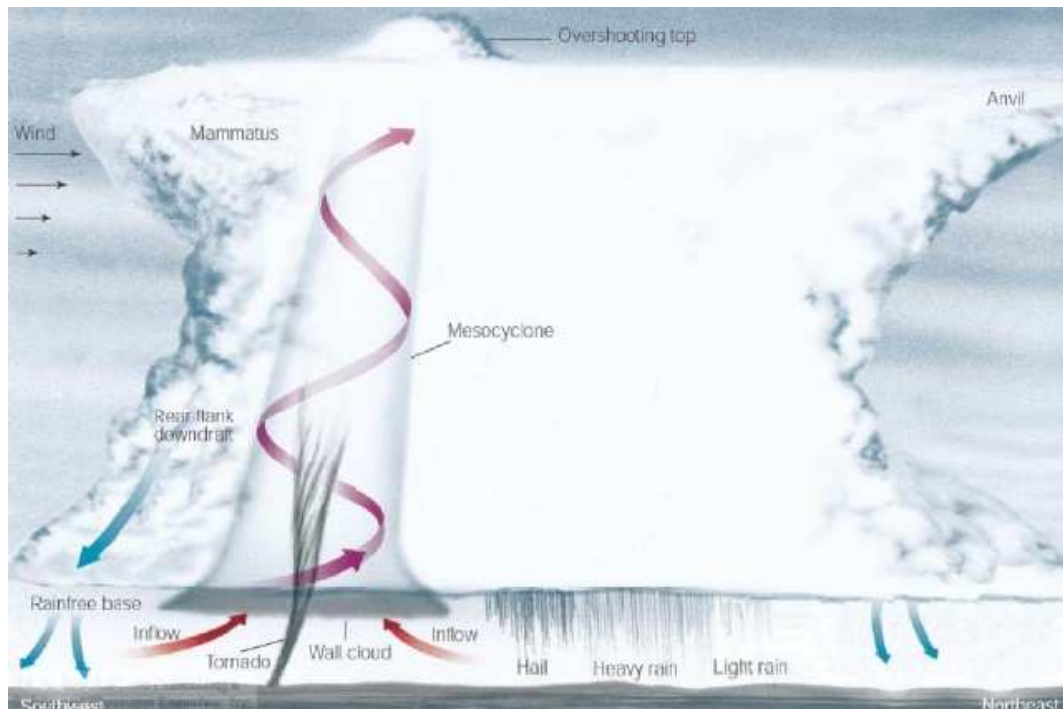


Fig. 51 : Structure typique d'une supercellule

Les tornades se produisent dans les supercellules puisque ces cellules sont en rotation. Nous avons besoin de plusieurs ingrédients que j'ai expliqués dans la partie concernant les supercellules. En effet, nous avons besoin de :

- fortes valeurs de CAPE (>2000J/kg)
- de fortes valeurs du point de rosée avec une forte humidité en provenance du Golfe du Mexique
- un jet de basses couches pour apporter toute cette humidité
- de forts vents en altitude (courant jet à 200-300hPa) supérieur à 25m/s et plus particulièrement orienté Sud-Nord dans l'allée des tornades.
- une CINH modérée ou forte (>150J /kg) autour de 900-850hPa, tard dans la journée
- un puissant mécanisme de soulèvement (front froid, ligne sèche) pour que le couvercle se disloque
- un fort cisaillement directionnel et de vitesse, surtout dans les basses couches (0-1 km)
- de fortes différences de températures supérieures à 7°/km (couche 2-4km)

Malheureusement pour les chasseurs d'orages et heureusement pour les habitants, les tornades ne se produisent pas toujours lorsqu'on rencontre tous ces paramètres cités ci-dessus. Mère Nature ne fait pas toujours ce qu'on pense qu'elle va faire, en dépit de tous les équipements et technologies du monde. C'est pourquoi, nous devons rester humbles devant la Nature et essayer de comprendre pourquoi les tornades se forment ou ne se forment pas grâce à des projets comme Vortex 2 ce printemps.

Enfin, pour classer une supercellule comme supercellule tornadique, plusieurs éléments doivent être présents comme un écho en crochet, un courant ascendant rotatif, un RFD (courant descendant de flanc arrière), un mésocyclone et/ou une tornade.

4. Echos radars

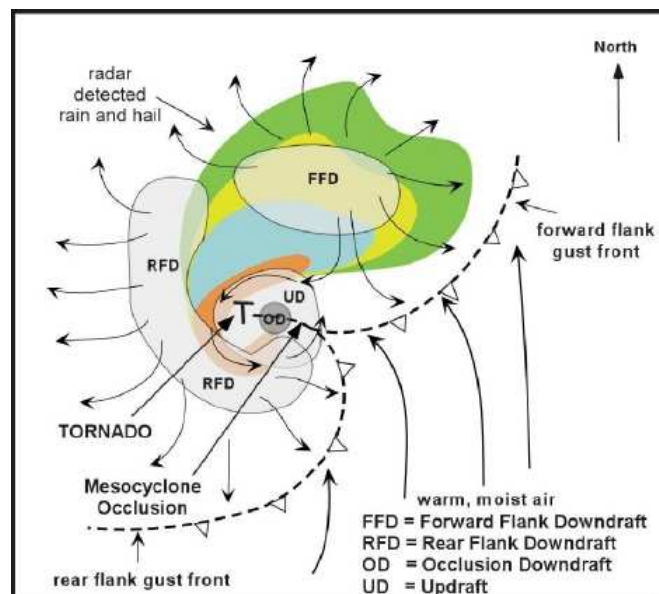


Fig. 52 : Echo radar d'une supercellule tornadique avec la localisation de la tornade

Une tornade, plus précisément les fortes tornades, ne peuvent être produites que par des supercellules. En effet, nous avons besoin d'un orage en rotation et les supercellules sont les seuls orages à pouvoir le faire. De plus, les supercellules classiques sont les meilleurs productrices de tornades puisqu'elles présentent un RFD corrélé avec un fort courant ascendant, comme nous l'avons vu dans la partie des supercellules. Nous trouvons le mésocyclone dans cette partie de la supercellule.

Le schéma ci-dessus nous montre la structure typique d'un écho radar d'une supercellule tornadique avec le RFD, l'UD, le FFD et plus spécialement le TVS ou « Signature Tornadique de Rotation » qui est assimilée à la signature radar de la tornade. Celui-ci est situé au centre du mésocyclone dans un fort gradient de vitesses verticales. Le TVS précède de 10 minutes environ l'arrivée de la tornade au sol. Ce schéma est presque identique à celui que j'ai utilisé pour la partie concernant les supercellules mais on peut cette fois voir la localisation de la tornade. Elle est située dans le front occlus (OD) qui n'est autre que la rencontre entre le RFD et l'UD. De plus, la localisation de la tornade est entourée par d'intenses précipitations telles que de fortes chutes de grêle ou d'abondantes précipitations pluvieuses.

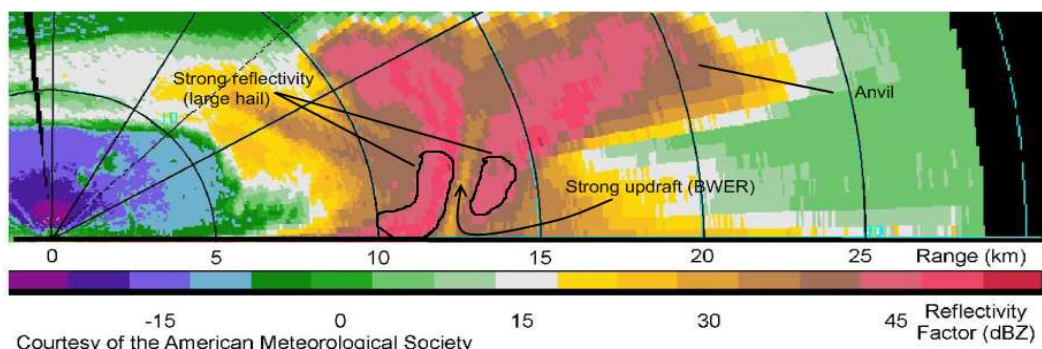


Fig. 53 : une coupe verticale d'une supercellule tornadique

Le schéma ci-dessus nous montre une section verticale d'une supercellule tornadique. En effet, on peut observer la réflectivité de l'orage avec l'enclume ainsi que les fortes valeurs de réflectivité proche de la tornade telles que de fortes chute de grêle. La localisation de la tornade est montrée par une faible réflectivité à cause du fort courant ascendant rotatif (BWER).

5. Chasses aux orages et aux tornades

Après de nombreuses heures passées à comprendre le mécanisme d'une supercellule ainsi que son radar écho typique, je suis parti chasser les supercellules et les tornades avec Jeff et une fois avec trois personnes travaillant au Centre National de Météo (NOAA, un étudiant diplômé et un professeur de météorologie).

Durant la première chasse, nous avons parcouru les plaines de l'Ouest et du Nord-Ouest de l'Oklahoma où un risque modéré fut émis par le Centre de Prévisions des Orages. Cette chasse fut l'une des meilleures puisque nous avons eu une magnifique supercellule classique puis HP (fortes précipitations) avec un très fort courant descendant. D'autre part, la plupart des chasseurs de tornades étaient présents ! Ce courant descendant produisit de très fortes chutes de grêle de la taille d'une balle de base ball. Nous avons pu voir des bases nuageuses très basses avec un impressionnant nuage mur très proche du sol. D'autre part, nous avons pu assister à une forte rotation sous celui-ci qui a produit un petit entonnoir/tuba mais malheureusement pas de tornades.



Fig. 54 : Photos de la supercellule du 25 avril avec un nuage mur très bas et un impressionnant mésocyclone

Le jour suivant fut vraiment frustrant puisque nous avons décidé de rester à Norman (qui était en risque modéré). En parallèle, un fort risque à tornades a été émis pour l'Ouest Oklahoma. Malheureusement, des tornades se sont produites exactement au même endroit où nous avons chassé la veille tandis que nous n'avons rien eu de vraiment intéressant ici à Norman !! La nuit a été plutôt intéressante avec un front de rafales suivies par de fortes pluies et une forte activité électrique.

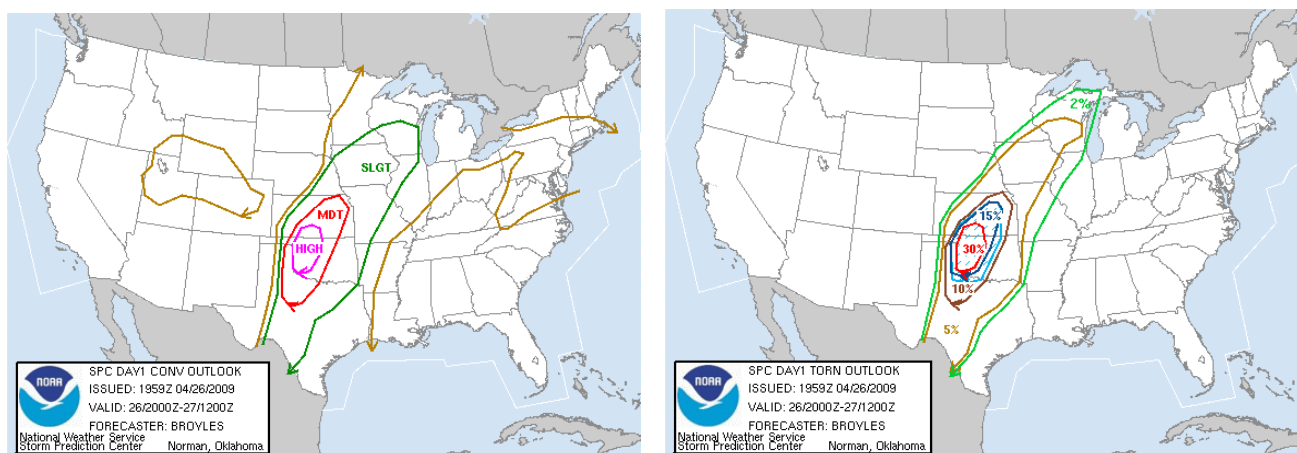


Fig. 55 : Prévisions convectives pour le 26 avril (à gauche) et risque de tornades en % (à droite) émis par le SPC.

La seconde chasse se déroula dans le Nord du Texas, près de Seymour et Wichita Falls. Nous avons eu une belle supercellule mais celle ci a très vite perdu de sa puissance pour ensuite mourir. C'est pourquoi, nous sommes revenus plus tôt que prévu à Norman. Je fus encore une autre fois vraiment frustré puisque cette cellule s'est régénérée juste après que nous soyons partis et celle ci a même produit une tornade avant l'arrivée de la nuit.

La troisième chasse dans le Sud-Est du Kansas fut vraiment intéressante, puisque cette fois nous avons pu assister à la formation d'une superbe supercellule LP qui a rapidement évolué vers une incroyable supercellule HP. Nous avons pu assister à une très forte rotation sous le mésocyclone, mais toujours sans tornades. Cependant, une alerte aux tornades a été lancée pour notre orage. L'arcus produit par le courant descendant du flanc arrière fut vraiment monstrueux avec le courant descendant de la supercellule qui a produit de très gros grêlons (de la taille d'une balle de base ball et d'une balle de tennis). Je pense que nous aurions pu voir une tornade grâce au processus de bas en haut expliqué précédemment.



Fig. 56 : Le mésocyclone ainsi qu'une vue de la supercellule HP avec son arcus et son RFD

J'ai chassé, pour la quatrième fois, dans le Sud du Kansas qui se situait dans un risque modéré pour de violents phénomènes météo avec Kenny (un météorologiste), Kevin (un étudiant diplômé) et Kim (de la NOAA). Beaucoup de chasseurs de tornades étaient présents ce jour là, proches de la ville de Wichita. Nous avons ainsi pu observer une supercellule classique (d'après moi) avec un peu de rotation mais pas suffisamment pour avoir des tornades. Par la suite, nous sommes dû traverser le rideau de précipitations de la supercellule (le courant descendant) dont les très fortes pluies mêlées de grêle étaient accompagnées de puissantes rafales de vent avec quelques débris sur la route. Cette supercellule se dissipa au moment où nous sommes parties mais celle-ci se régénéra avec un nouveau puissant courant ascendant comme on peut le voir sur l'image suivante (à droite). Quelques brèves tornades ont été relevées ce jour là.



Fig. 57 : Vue de l'orage avec une photo du puissant courant ascendant de notre supercellule

La cinquième chasse ne fut pas réellement une chasse à proprement parler puisque nous sommes restés à Norman. Après avoir regardé la finale de hockey sur glace avec Brad et son ami Danny, nous sommes sortis de sa maison pour prendre quelques photos de foudre puisqu'un orage était en formation. La base des nuages était très basse en raison d'un point de rosée très élevé (73°F ou 23°C). En outre, nous avons pu observer de forts courants verticaux. Par la suite, nous avons décidé de trouver un autre point de vu pour admirer l'orage. A ce moment là, nous avons vu un impressionnant nuage mur, mais nous n'étions pas sûr puisqu'il faisait nuit. Je suis alors rentré dans la maison et je fus vraiment surpris en voyant à la télévision une alerte aux tornades émise pour notre comté. Un mésocyclone a été alors identifié avec une bonne rotation sur le radar doppler. Je n'y croyais pas... une tornade en pleine nuit à Norman ?! J'ai donc pris mon appareil photo et j'ai pu prendre quelques photos du nuage mur avec la tornade au sol (j'ai accentué le contraste pour mieux l'observer). Ce fut vraiment impressionnant et excitant à la fois.



Fig. 58 : Photos de la tornade classée EF1 à Norman le 12 juin 2009 vers 22h33

Nous avons alors décidé de prendre la voiture pour chasser cette tornade mais celle-ci se dissipa rapidement. Cependant, cette supercellule produisit de jolis impacts de foudre comme on peut le voir dans les images suivantes (5 impacts sur la première photo).



Fig 59 : Photos d'impacts de foudre de cet orage

Après cette nuit épique, nous avons décidé d'aller voir les dégâts produits par cette tornade. Nous avons ainsi pu voir beaucoup d'arbres endommagés et découvrir d'autres photos concernant divers dégâts tels des clôtures à terre ou encore des toitures emportées par le vent.

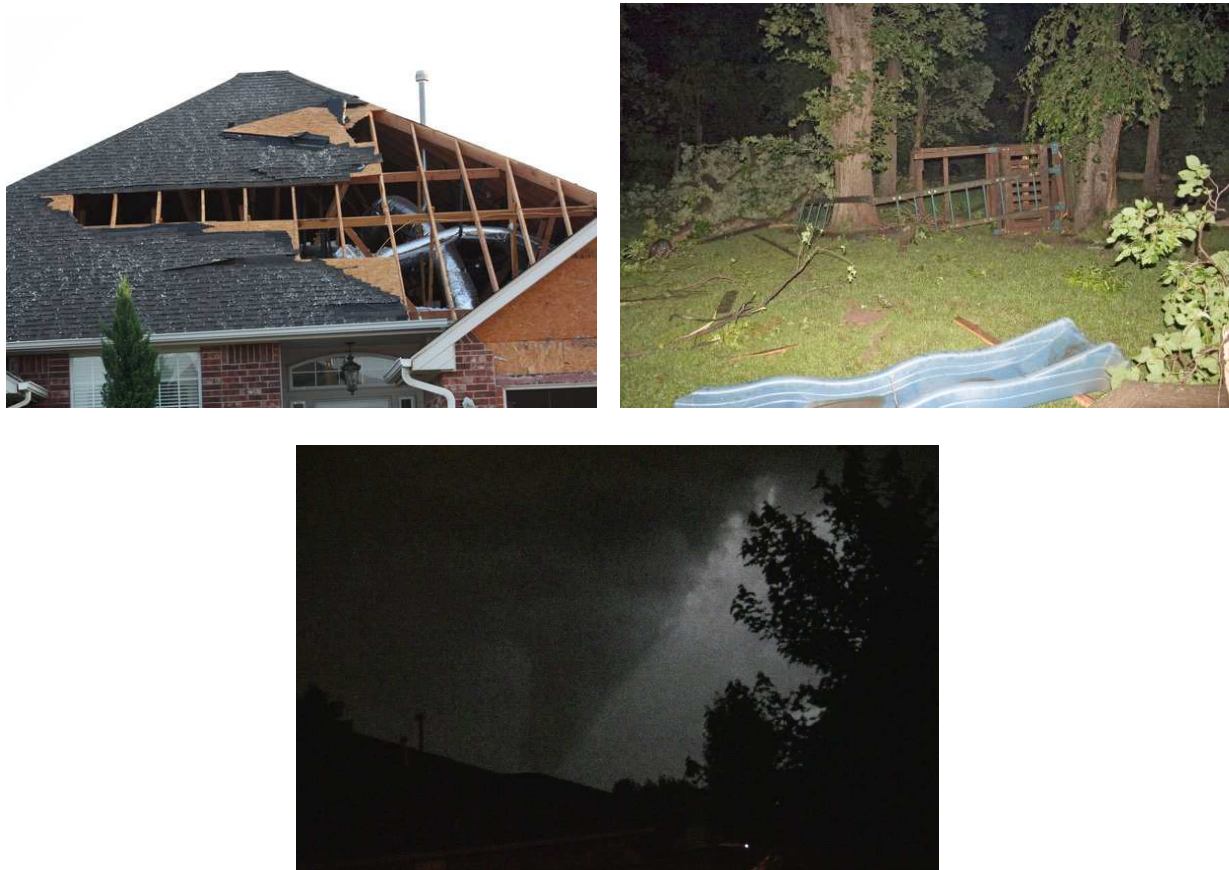


Fig. 60 : Dégâts produits par la tornade ainsi qu'une capture vidéo de cette tornade

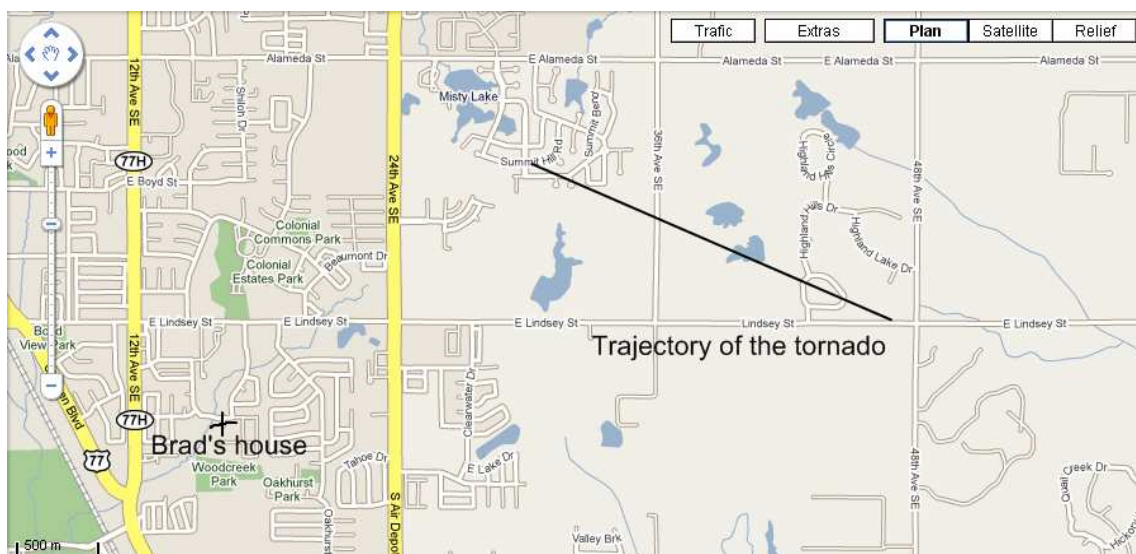


Fig 61. : Notre localisation (maison de Brad) et trajectoire probable de la tornade

6. Avis et Classification des tornades

Tout d'abord, les prévisions convectives sont émises par le Storm Prediction Center (SPC) et concernent seulement les USA. Ces cartes permettent d'observer le risque d'orages violents jusqu'à 8 jours. De plus, nous avons 4 mises à jour pour le premier jour de prévision, une seule mise à jour pour les jours suivants. Le SPC émet des cartes de risques(/chances) pour de forts orages : général, faible, modéré et risque élevé (*Annexe M*). D'autre part, ils émettent des probabilités en pourcentages concernant un type précis de phénomènes météorologiques violents comme les tornades (*Annexe N*), de grosses chutes de grêle (*Annexe O*) et enfin de forts vents (*Annexe P*).

Je vais maintenant vous parler de deux avis liées aux tornades : l'avis de surveillance et l'alerte aux tornades.

D'une part, l'avis de surveillance est émis, couvrant plusieurs comptés, bien avant la formation des orages quand les conditions météorologiques sont favorables pour des tornades. Cette surveillance a une durée de quelques heures (4-8h) et concernent les comptés qui se situent dans et proche de la zone de surveillance. En outre, la taille ou la durée de cette zone de surveillance varient en fonction de la situation météorologique (*Annexe Q*).

D'autre part, les alertes aux tornades sont émises quand une supercellule est formée avec un écho en crochet ainsi qu'avec un mésocyclone évident. C'est un critère suffisant pour déclencher une alerte car c'est l'un des ingrédients principaux avant qu'une tornade ne se forme. Le TVS ou « Signature Tornadique de Rotation » est un très bon informateur puisqu'il précède (d'environ 10 minutes) l'arrivée de la tornade au sol. Une alerte aux tornades peut également être émise quand les chasseurs de tornades ou les habitants locaux sont sur le terrain et voient une tornade. Ces alertes ont une durée d'environ 20 minutes et peuvent être parfois émises sans un avis de surveillance pour les tornades (*Annexe R*).

Enfin, des avis de surveillance mais aussi d'alerte peuvent être émis pour de violents orages, de la même manière que pour les tornades. En outre, une autre alerte peut être émise concernant les inondations éclairs.

Les tornades ont été classées pour la première fois par Ted Fujita. Il a créé en 1971 sa propre échelle appelée "Echelle de Fujita" dans le but de classer l'intensité des tornades en fonction des dégâts qu'elles causent sur les infrastructures. Cette échelle commence à F0 et fini à F5. Nous pouvons voir en *Annexe S* la vitesse des vents, la fréquence et le potentiel donné à chaque type de tornade tels que F0, F2 ou encore F5. La plupart du temps, ce sont des F0 qui se produisent suivies par les F1, les F2 et les F3. Les F4 et F5 sont très rares (seulement 0-1%) mais produisent les vents les plus violents sur Terre (330 à 500km/h) ainsi que les plus gros dégâts.

ORIGINAL FUJITA SCALE		ENHANCED FUJITA SCALE	
F5	261-318 mph	EF5	+200 mph
F4	207-260 mph	EF4	166-200 mph
F3	158-206 mph	EF3	136-165 mph
F2	113-157 mph	EF2	111-135 mph
F1	73-112 mph	EF1	86-110 mph
F0	<73 mph	EF0	65-85 mph

Fig. 62 : Comparaison de la vitesse des vents entre l'échelle de Fujita et l'échelle améliorée de Fujita (1mph = 1,6km/h)

Récemment, en février 2007, l'échelle de Fujita a été améliorée. Celle-ci prend maintenant en compte la structure et le type de bâtiments pour donner une meilleure représentation de la force des tornades. C'est pourquoi, cette nouvelle échelle est maintenant utilisée aux USA. On a par exemple classé une tornade EF4 alors qu'on l'aurait peut-être classée F3 avec l'ancienne échelle.

CONCLUSION

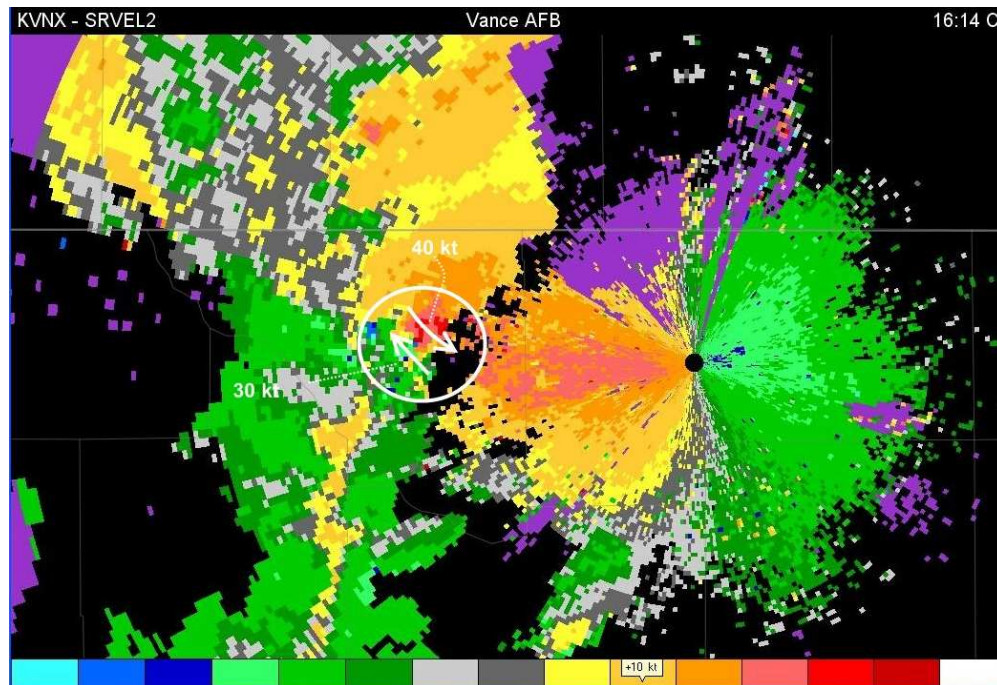
Je crois que ce stage en Oklahoma, et plus particulièrement au National Weather Center, fut une de mes meilleures périodes jamais passées. Mon but était clair : comprendre le mécanisme des supercellules ainsi que les tornades et la plupart des éléments que l'on peut trouver dans un radiosondage. D'autre part, mon rêve était de voir et d'étudier un cas de tornade avec une description en temps réel. Ce rêve a été réalisé puisque j'ai pu voir une magnifique tornade de nuit. De plus, j'ai enrichi mes connaissances météorologiques, surtout concernant les supercellules et les tornades. Les chasses aux tornades ont été vraiment magnifiques et j'ai eu la chance de pouvoir étudier et comprendre en temps réel la structure d'une supercellule. J'ai aussi pu prendre de superbes photos de ces supercellules, de l'arcus et enfin d'impacts de foudre, parfois très proches.

Ma passion pour la météorologie s'est accrue avec ce stage extraordinaire. Je souhaite aller encore plus loin dans la connaissance de ces phénomènes et m'impliquer plus tard, à la fin de mes études, dans un grand projet tel que celui de Vortex 2 afin d'étudier et de comprendre tous les cas de supercellules (tornadiques ou non).

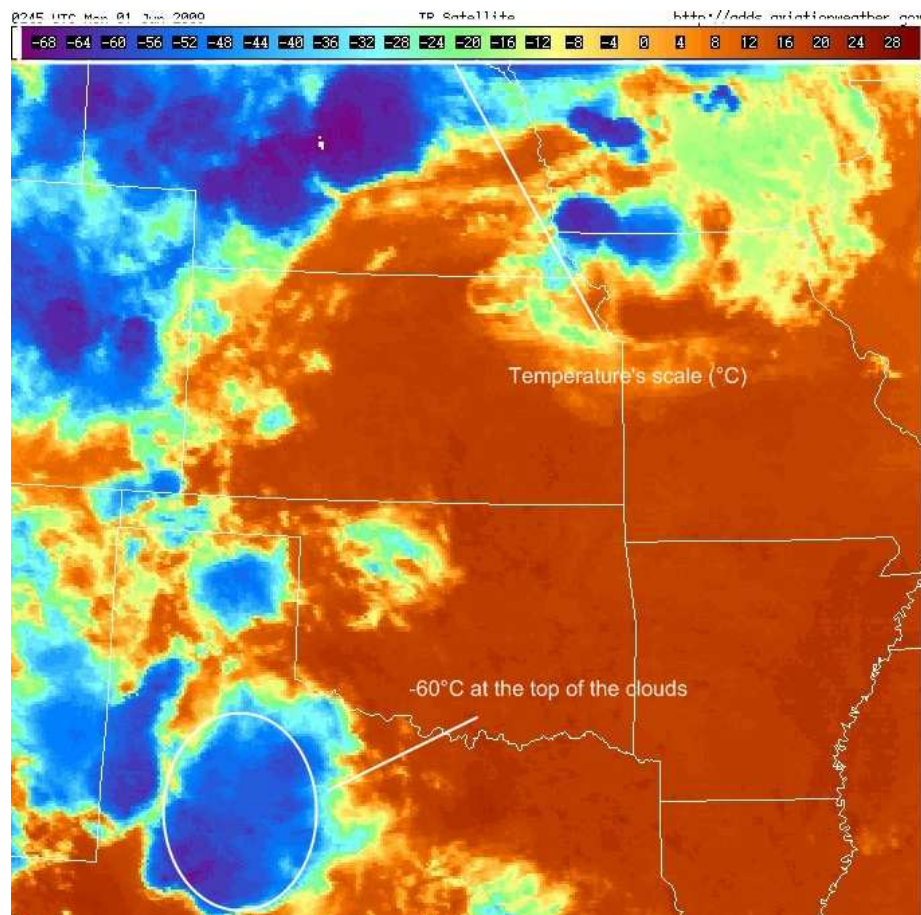
Enfin, j'ai adoré la vie américaine et mon logement à Traditions Square West. En effet, le campus et sa magnifique architecture ainsi que les personnes vivants sur le campus qui ont été très accueillantes. J'ai pu rencontrer beaucoup de gens grâce à mon colocataire américain et découvrir une autre culture ainsi qu'un mode de vie différent.

ANNEXES

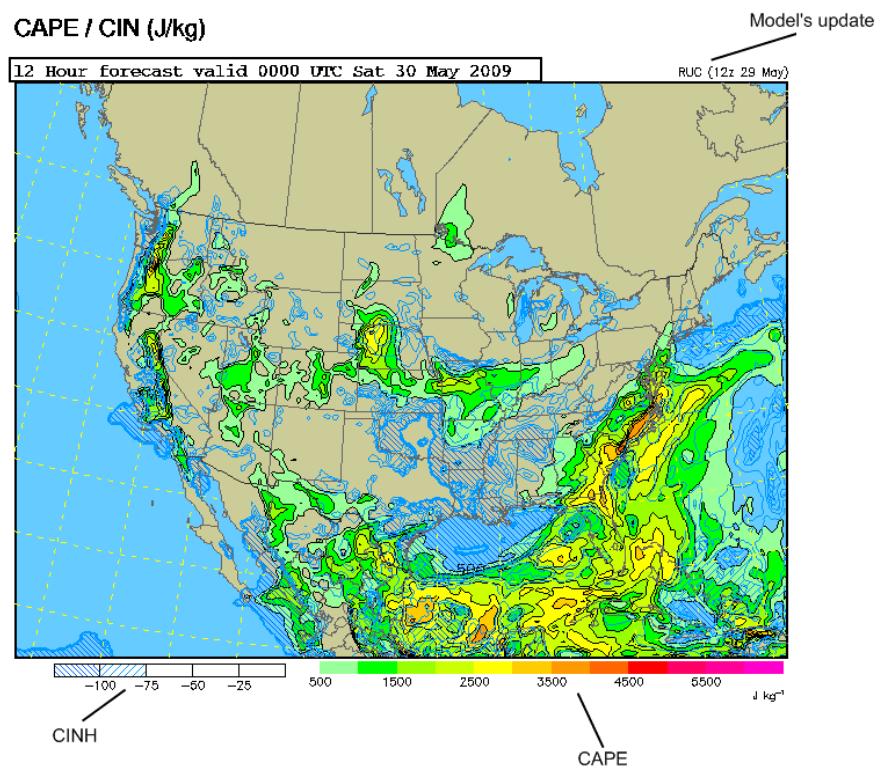
Annexe A : Un mésocyclone vu par le radar « Vitesse relative du déplacement de l'orage »



Annexe B : Image satellite InfraRouge (IR)

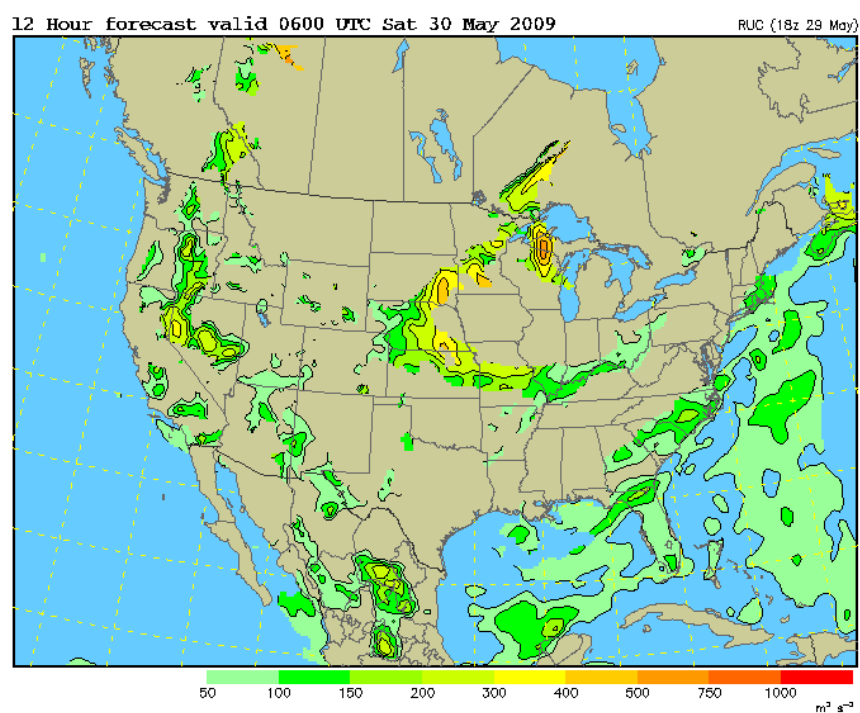


Annexe C : Un exemple de prévisions de la CAPE/CINH pour les USA (modèle RUC)



Annexe D : Exemple de prévisions de la SRH avec le modèle RUC

Storm-relative Helicity (m^2/s^2) & CAPE>0



Annexe E : Supercellule LP avec un fort courant ascendant rotatif identifiable par la torsion des nuages



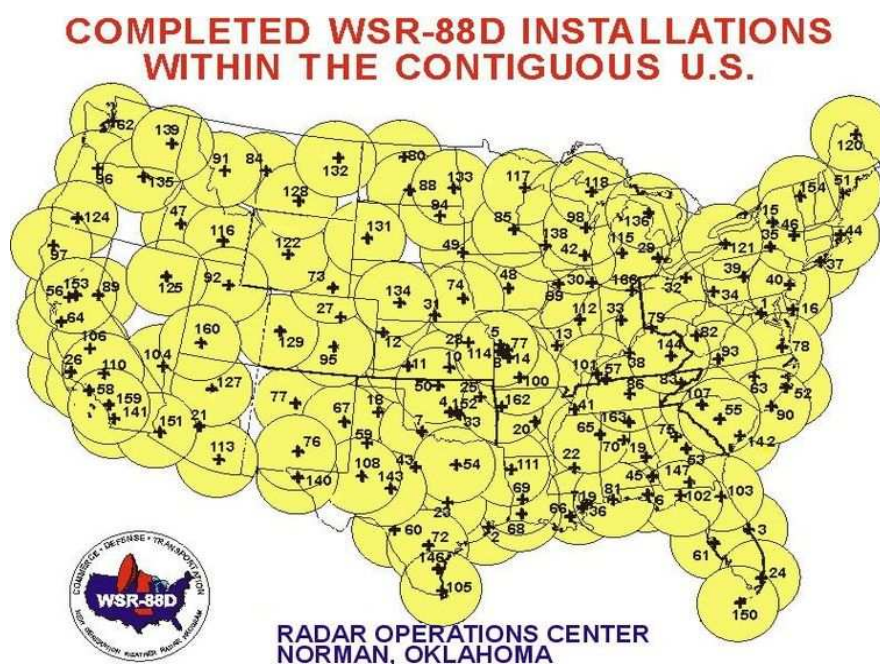
Annexe F : Supercellule HP avec son arcus et son front de rafales produit par le RFD



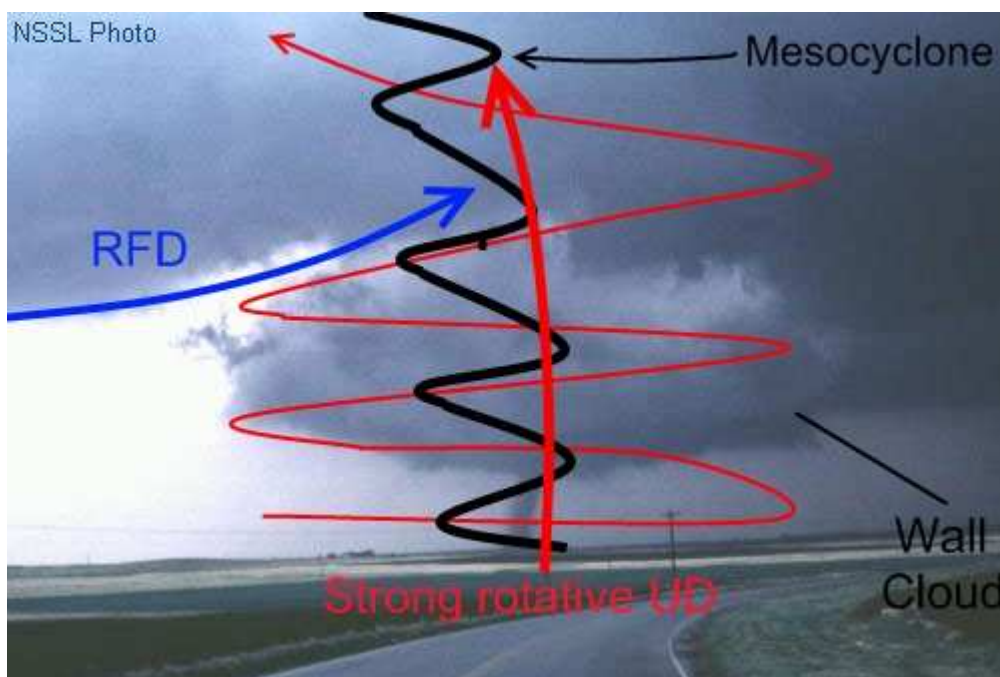
Annexe G : Supercellule classique produisant une tornade



Annexe H : Le réseau de surveillance météorologique NEXRAD qui compte 160 radars

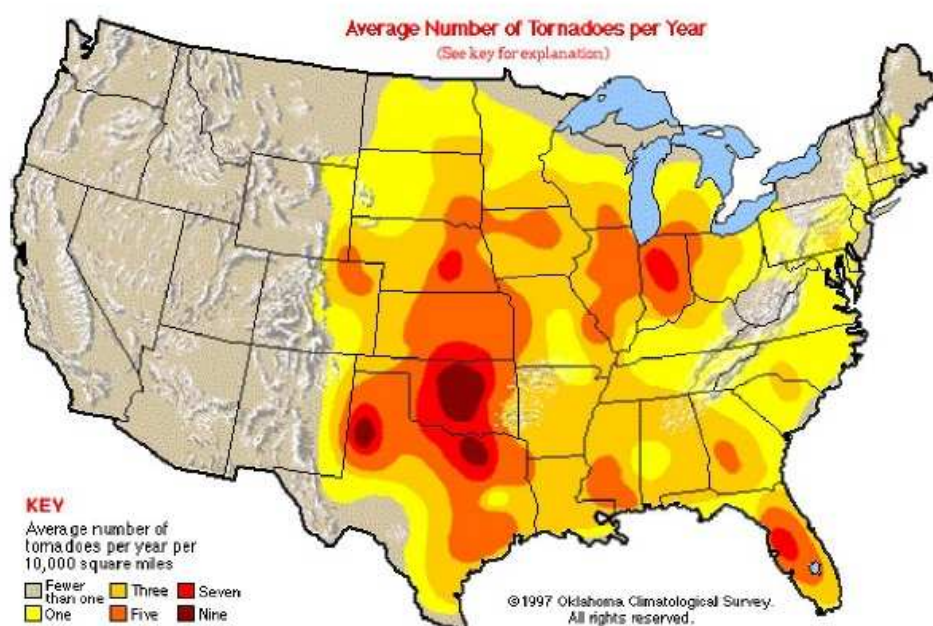


Annexe I : Le RFD ou "Courant descendant de flanc arrière" (en bleu) avec le nuage-mur. On peut identifier la localisation du courant ascendant (UD) en rouge ainsi que le mésocyclone (noir).

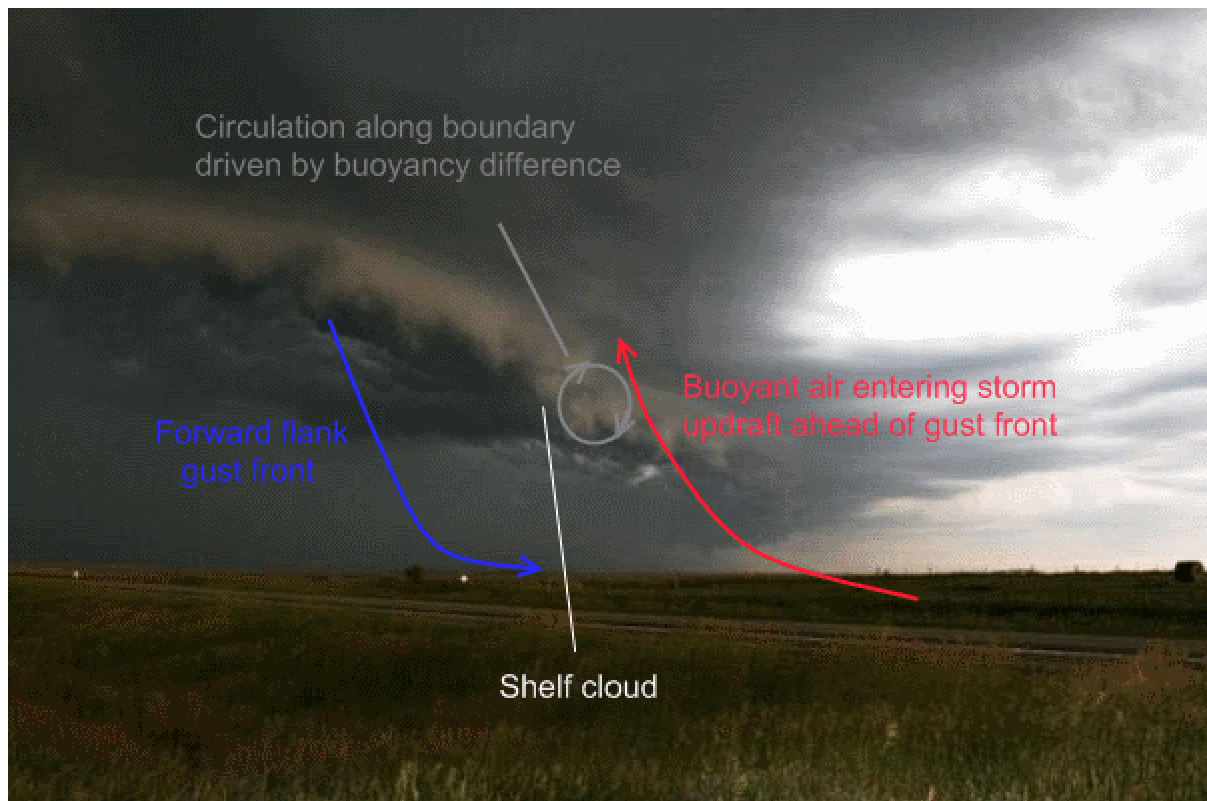


Annexe J : Nombre moyen de tornades par an par 10 000 miles² (ou 16 000 km²)

Tornado Locations



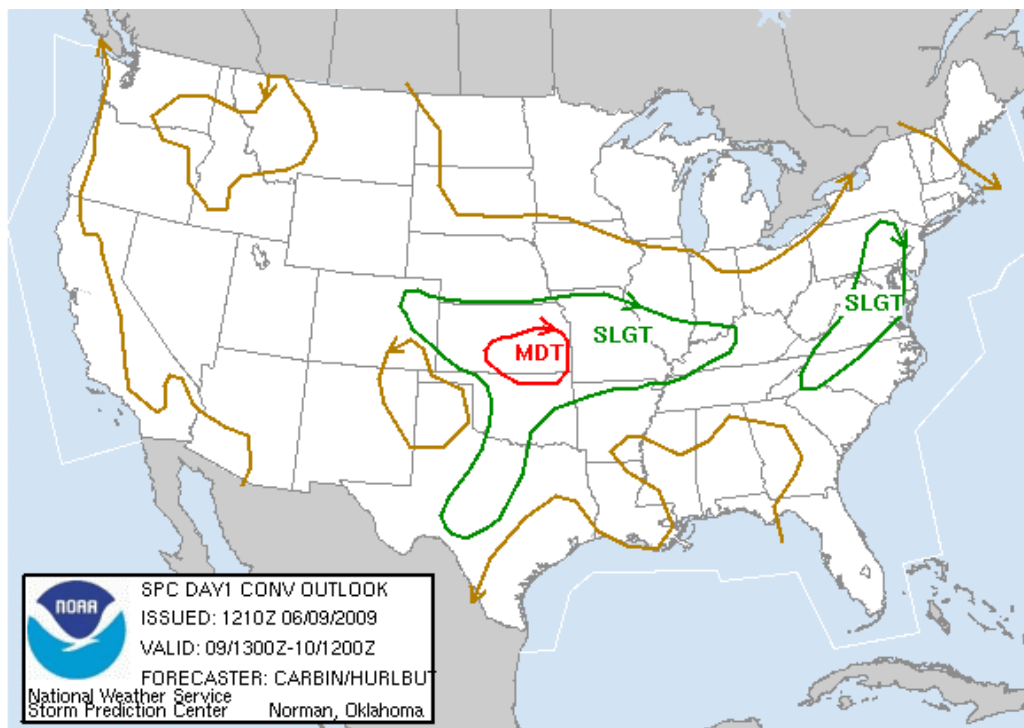
Annexe K : Explication et mécanisme de l'arcus qui peut produire une tornade (théorie n°2)



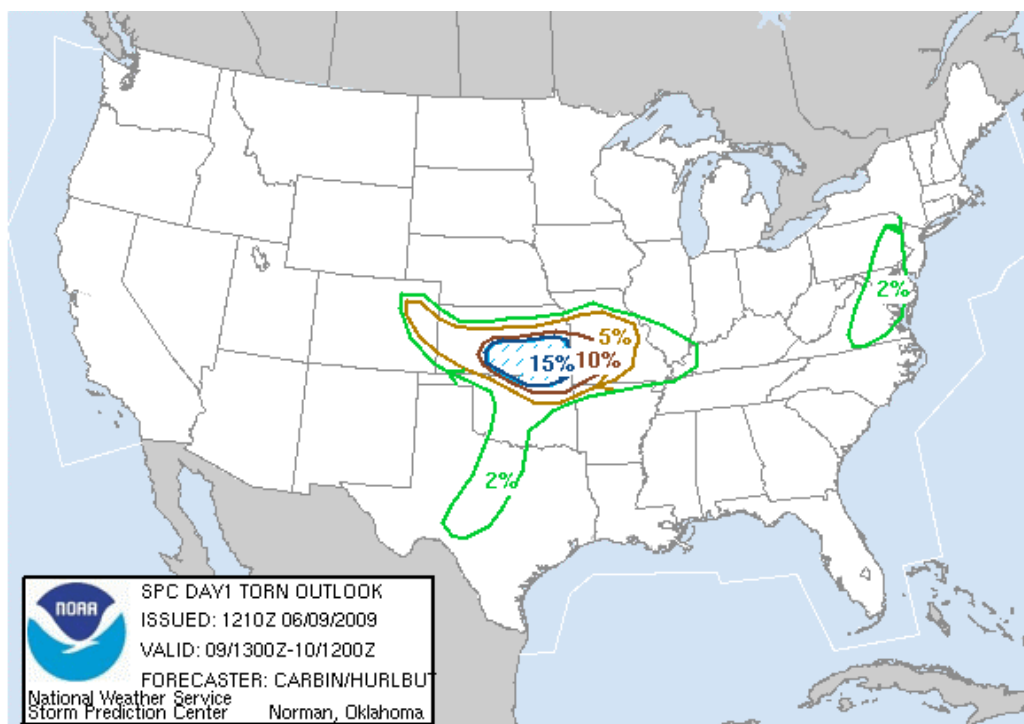
Annexe L : La tornade de Wichita en 2004 qui est un bon exemple montrant l'effet de tube dynamique



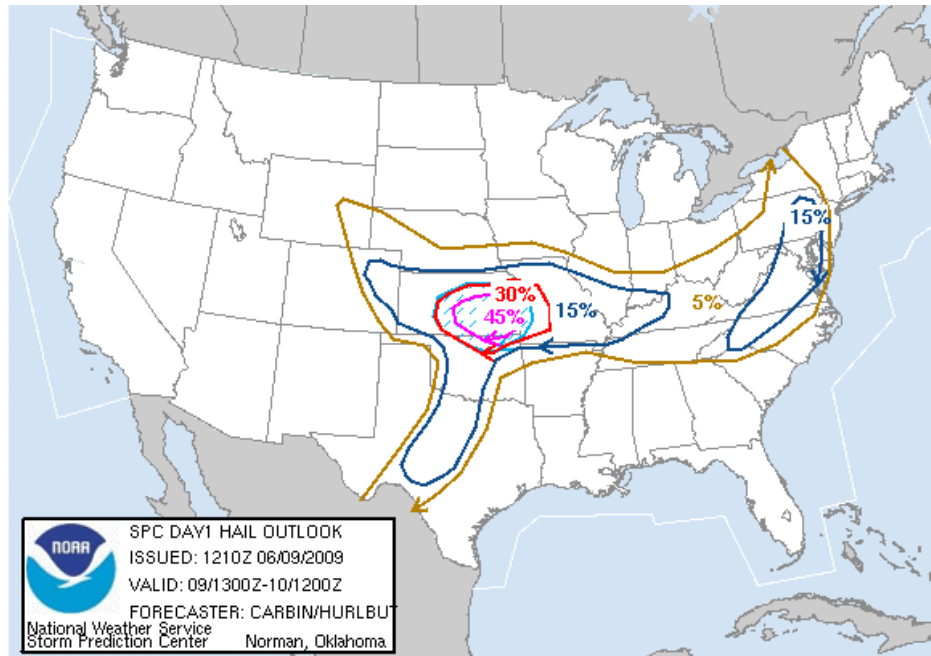
Annexe M : Exemple de prévisions convectives avec un risque modéré de phénomènes violents sur la limite Kansas-Oklahoma



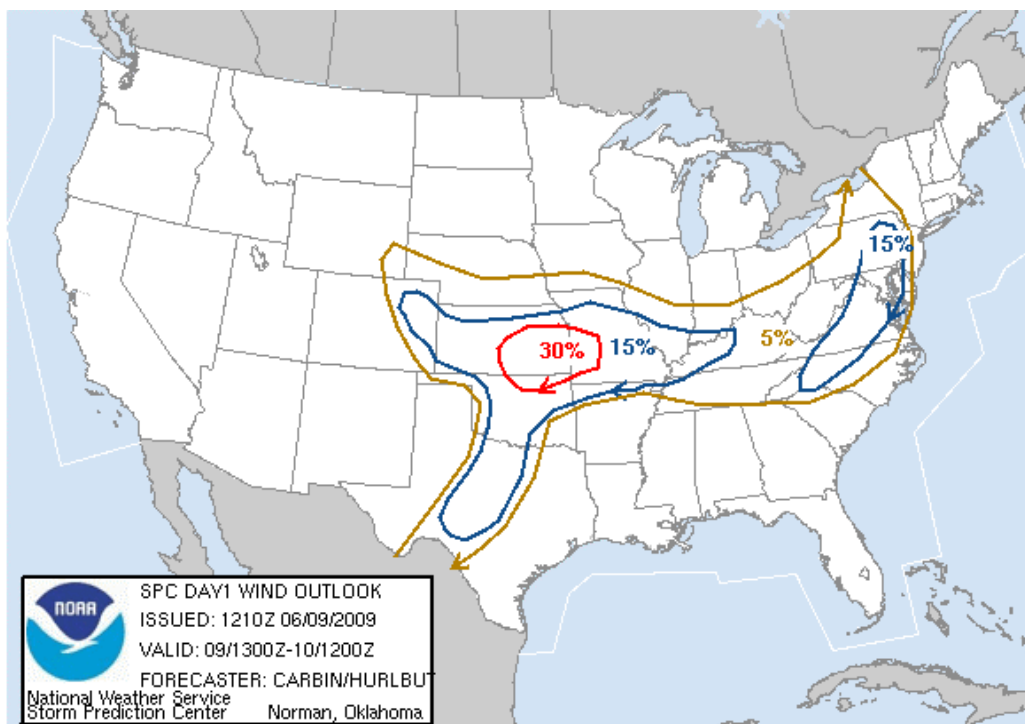
Annexe N : Probabilité de tornades en % tous les 25 miles (ou 40 km). La zone hachurée montre une probabilité de 10% ou plus pour des tornades EF2-EF5 tous les 25 miles.



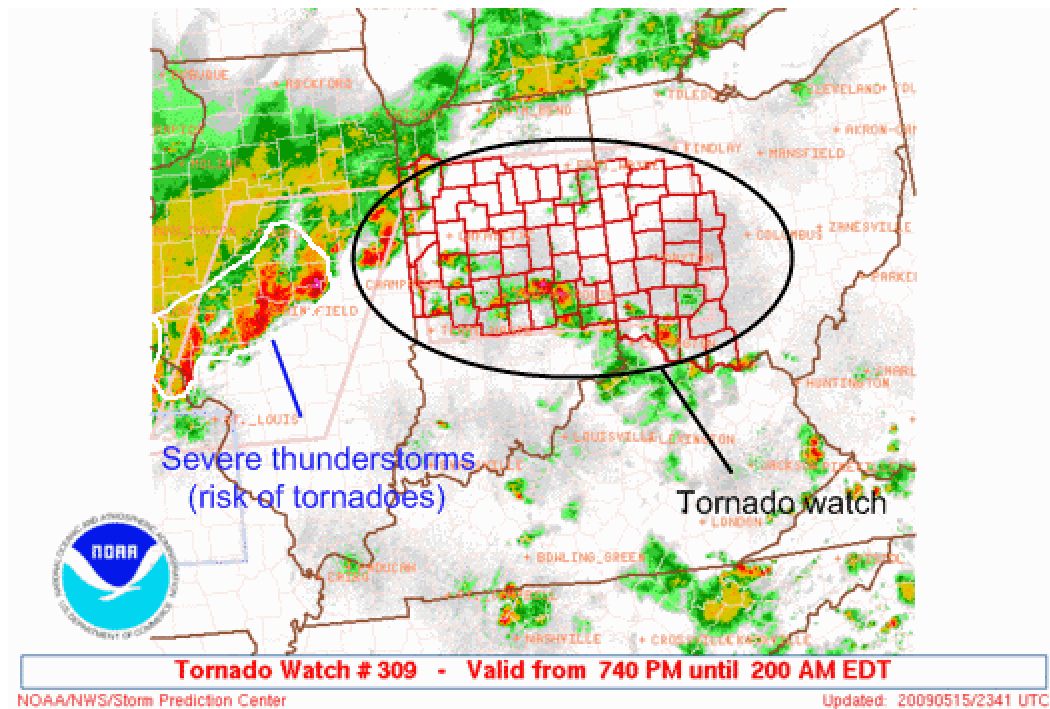
Appendix O : Probabilité de fortes chutes de grêle de $\frac{3}{4}$ " (=2cm) ou plus ,en %, tous les 25 miles (ou 40 km). La zone hachurée montre une probabilité de 10% pour des grêlons de 2" soit 5cm ou plus, tous les 25 miles.



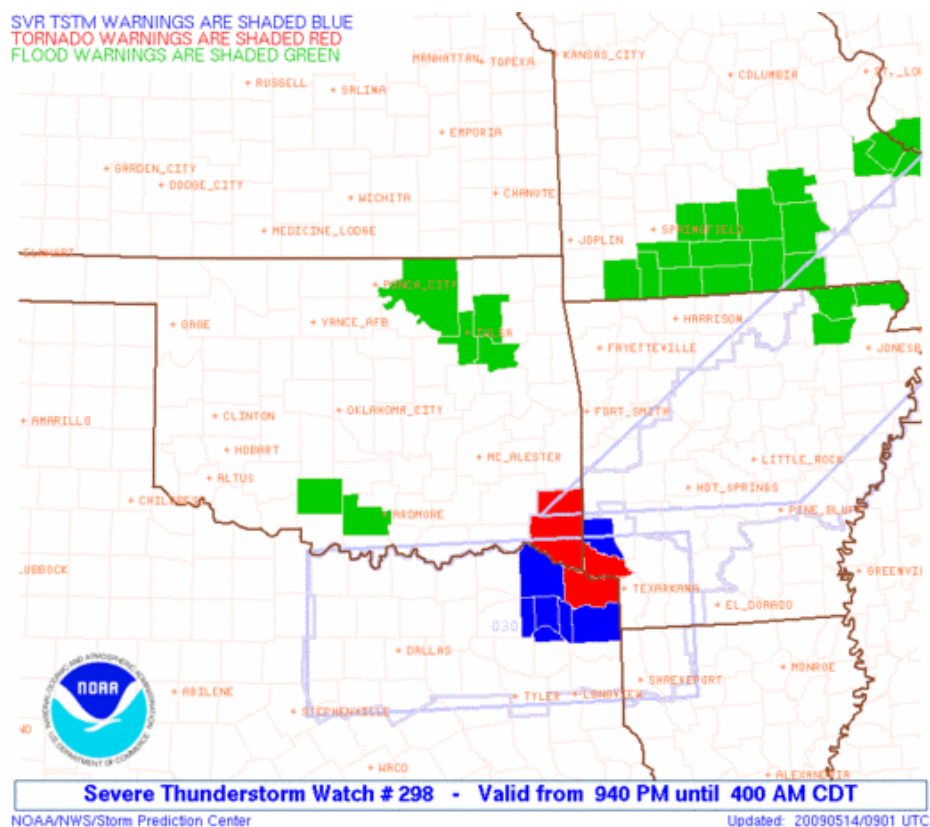
Appendix P : Probabilité en %, pour de fortes rafales de 50 nœuds ou plus, ou bien des vents causant des dégâts, tous les 25 miles. La zone hachurée (non présente ici) montre une probabilité de 10% ou plus pour des rafales de vent de 65 nœuds ou plus, tous les 25 miles.



Appendix Q : Carte de surveillance des tornades pour de nombreux comptés (en rouge) en prévision de violents orages pouvant générer des tornades.



Appendix R: Alerte aux tornades pour différents comptés (en rouge sur l'image ci-dessous). On peut voir d'autres types d'alertes tels que les inondations éclairs (vert) ou encore les violents orages (bleu).



Appendix S : Echelle de Fujita en détails (vitesse des vents, fréquences, dégâts)

Scale	Estimated wind speed [†]		Relative frequency	Average Damage Path Width (meters)	Potential damage ^[3]	
	mph	km/h				
F0	40–72	64–116	38.9%	10 - 50	Light damage. Some damage to chimneys; branches broken off trees; shallow-rooted trees pushed over; sign boards damaged.	
F1	73–112	117–180	35.6%	30 - 150	Moderate damage. The lower limit is the beginning of hurricane wind speed; peels surface off roofs; mobile homes pushed off foundations or overturned; moving autos pushed off the roads; attached garages may be destroyed.	
F2	113–157	181–253	19.4%	110 - 250	Considerable damage. Roofs torn off frame houses; mobile homes demolished; boxcars overturned; large trees snapped or uprooted; light-object missiles generated.	
F3	158–206	254–332	4.9%	200 - 500	Severe damage. Roofs and some walls torn off well-constructed houses; trains overturned; most trees in forest uprooted; heavy cars lifted off the ground and thrown.	
F4	207–260	333–418	1.1%	400 - 900	Devastating damage. Well-constructed houses leveled; structures with weak foundations blown away some distance; cars thrown and large missiles generated.	
F5	261–318	419–512	Less than 0.1%	1100 ~	Total damage. Strong frame houses lifted off foundations and carried considerable distances to disintegrate; automobile sized missiles fly through the air in excess of 100 m (109 yd); trees debarked; steel reinforced concrete structures badly damaged; incredible phenomena will occur.	

Appendix T : Echelle de Fujita améliorée (vitesse des vents, fréquence, dégâts)

Scale	Wind speed		Relative frequency	Potential damage	
	mph	km/h			
EF0	65–85	105–137	53.5%	Light damage. Peels surface off some roofs; some damage to gutters or siding; branches broken off trees; shallow-rooted trees pushed over. Confirmed tornadoes with no reported damage (i.e. those that remain in open fields) are always rated EF0.	
EF1	86–110	138–178	31.6%	Moderate damage. Roofs severely stripped; mobile homes overturned or badly damaged; loss of exterior doors; windows and other glass broken.	
EF2	111–135	179–218	10.7%	Considerable damage. Roofs torn off well-constructed houses; foundations of frame homes shifted; mobile homes completely destroyed; large trees snapped or uprooted; light-object missiles generated; cars lifted off ground.	
EF3	136–165	219–266	3.4%	Severe damage. Entire stories of well-constructed houses destroyed; severe damage to large buildings such as shopping malls; trains overturned; trees debarked; heavy cars lifted off the ground and thrown; structures with weak foundations blown away some distance.	
EF4	166–200	267–322	0.7%	Devastating damage. Well-constructed houses and whole frame houses completely leveled; cars thrown and small missiles generated.	
EF5	>200	>322	<0.1%	Exploding damage. Strong frame houses leveled off foundations and swept away; automobile-sized missiles fly through the air in excess of 100 m (300 ft); steel reinforced concrete structure badly damaged; high-rise buildings have significant structural deformation; incredible phenomena will occur. So far there have been two EF5 tornadoes recorded since the Enhanced Fujita Scale was introduced on February 1, 2007. The most recent one occurred in Parkersburg, Iowa on May 25, 2008 and leveled half the city. See Greensburg, Kansas tornado , Northeast Iowa supercell	