Belgorage

A L'ÉCOUTE DES ORAGES

Les tornades du 4 juin 2015 à Simla dans l'état du Colorado aux États-Unis

Dossier

Tous droits réservés @ Belgorage

Dossier réalisé par :

Jean-Yves Frique
Membre responsable et co-fondateur de Belgorage

Robert Vilmos
Membre associé de Belgorage

En collaboration avec :

François Riguelle
Membre associé de Belgorage

Relecture et mise en page réalisées par :

Michael Baillie et **Samina Verhoeven**
Membres responsables et co-fondateurs de Belgorage

Photos de couverture réalisées par :

Samina Verhoeven
Membre responsable et co-fondatrice de Belgorage

Tables des matières

1. Introduction **5**

2. Éléments de géographie générale **6**

2.1. Les tornades au Colorado 7

2.2. La Palmer Divide 8

2.3. La Raton Range 15

3. Etude du contexte météorologique du 4 juin 2015 ..... **17**

3.1. Prévisions du Storm Prédiction Center 17

3.2. Situation atmosphérique réelle 20

3.2.1. Analyse météorologique à très petite échelle 25

4. Formation des tornades et l'importance du RFD (ou courant descendant de flanc arrière) dans la survenue de celles-ci **31**

5. Les orages supercellulaires cycliques produisant plusieurs tornades **36**

6. Les tornades à rotation anticyclonique **40**

7. Deux zones de rotation (cyclonique et anticyclonique) sous la base du même mésocyclone **45**

8. Images radars **48**

8.1. Images radars de réflectivité 48

8.2. Images radars de vélocité 49

8.3. Diagramme des champs des vents à différentes altitudes 52

9. Déroulement de la situation, analyses satellites, radars et photographiques **56**

10. La tornade de Berthoud **95**

11. Conclusion **97**

12. Sources et références **98**

1. Introduction

Lors d'une traque menée par notre équipe le 4 juin 2015 dans la région de Simla au Colorado, nous avons pu assister à la survenue de plusieurs tornades produites par un seul et même orage supercellulaire et ce alors que les conditions météorologiques s'annonçaient être théoriquement bien meilleures à quelques centaines de kilomètres de là, au Kansas.

Au total, huit tornades se sont en effet succédées en l'espace d'environ une heure, dont deux simultanément. Les différentes observations faites par l'équipe avant, pendant et après la survenue de ces tornades permettent d'allier les connaissances théoriques avec les observations sur le terrain et ce d'autant plus que les observateurs étaient positionnés à des distances proches de la zone de rotation. La faiblesse des précipitations et le déplacement lent de la supercellule ont permis une observation du courant ascendant ainsi que des tornades dans des conditions optimales avec de nombreuses photographies à la clef.

Dans cette étude, nous allons analyser en profondeur cet orage pour tenter de comprendre pourquoi ce dernier a pu produire huit tornades.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

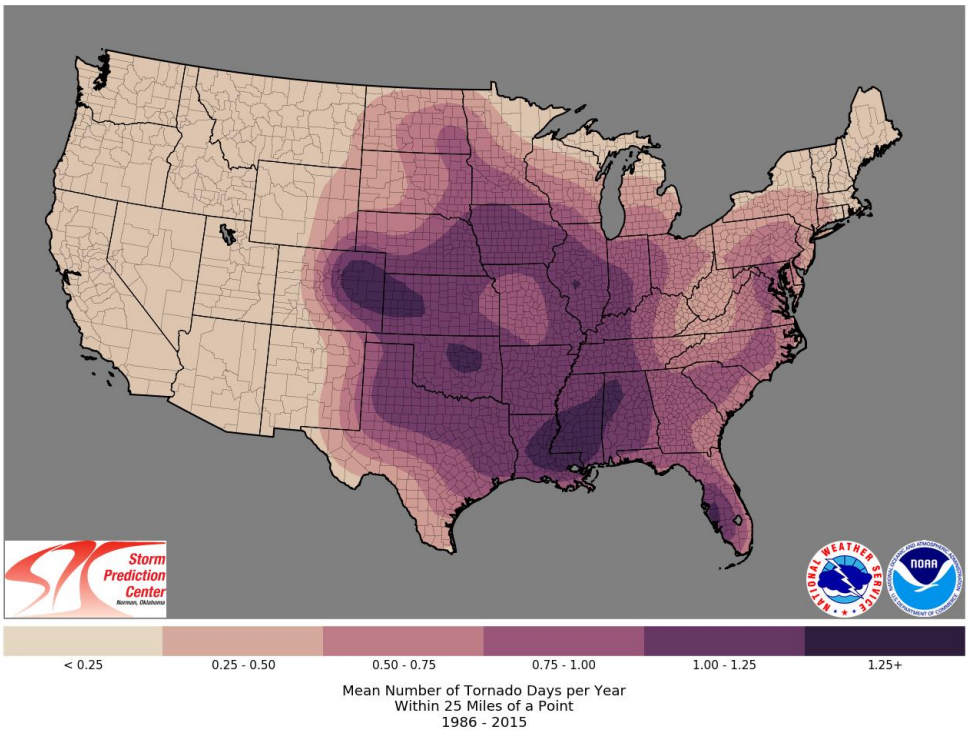
2. Éléments de géographie générale

La Tornado Alley est la région, aux États-Unis, où le risque de tornades est statistiquement le plus élevé. Cela ne veut pas dire, évidemment, que les tornades ne se produisent que là, mais la fréquence du phénomène y est telle que l'utilisation du terme « Tornado Alley » n'est certainement pas abusive. Il s'agit en fait d'une région immense qui, à l'origine du terme, traversait tout le centre des États-Unis en s'étendant du Minnesota au Texas. Depuis, on désigne plus communément par « Tornado Alley » l'ensemble des états situés entre les Montagnes Rocheuses à l'ouest et les Appalaches à l'est.

La plaine, en allant vers l'ouest, ne se transforme que très progressivement en haut plateau. Le voyageur ne se rend absolument pas compte de la différence d'altitude qui existe entre la partie orientale (300 à 400 mètres) et la partie occidentale (plus de 1000 mètres) des Grandes Plaines.

Les régions les plus touchées par les tornades sont l'est du Colorado, l'ouest du Kansas, le centre de l'Oklahoma et le sud du bassin du Mississippi. En dehors de la Tornado Alley, l'ouest de la Floride connait également un nombre de tornade élevé.

Comme nous pouvons le constater sur la carte ci-dessous, l'est du Colorado connait un important nombre de tornades annuel. Nous allons décrire dans le chapitre suivant les raisons à cela.

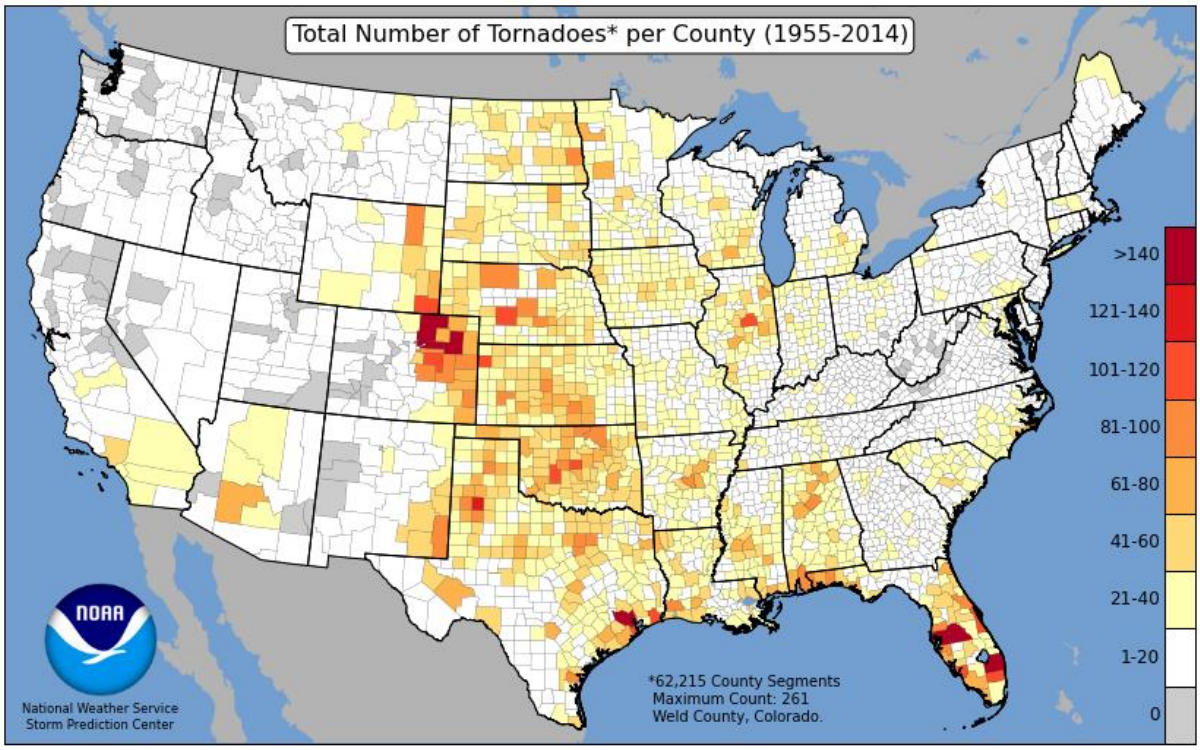


Source de l'image : **Storm Prediction Center**

2.1. Les tornades au Colorado

Le Colorado connait un très grand nombre de tornades annuel. Selon les études menées, certaines régions du Colorado font partie des endroits les plus fréquemment touchés par les tornades aux Etats-Unis.

Ainsi, le comté de Weld est celui qui a connu le plus grand nombre de tornades observé sur le territoire américain entre 1955 et 2014.



Source de l'image : **Storm Prediction Center**

Certains comtés situés au sein des Montagnes Rocheuses ne connaissent cependant aucune tornade. De ce fait, on peut diviser cet état en deux parties bien distinctes : la première située à l'ouest d'une ligne s'étirant de Fort Collins à Pueblo, en passant par Denver et Colorado Springs et la seconde, située à l'est de cette même ligne.

Toutefois, la très grande majorité des tornades sont de faible intensité. La plupart sont d'une intensité EF0 ou EF1 sur la nouvelle échelle de Fujita. En outre, ces tornades ne parcourent généralement pas de grande distance et ne perdurent pas plus de quelques minutes au sol. Ces comportements sont pour une grande partie liés à leur origine. En effet, la majorité des tornades observées au Colorado ne sont pas d'origine mésocyclonique.

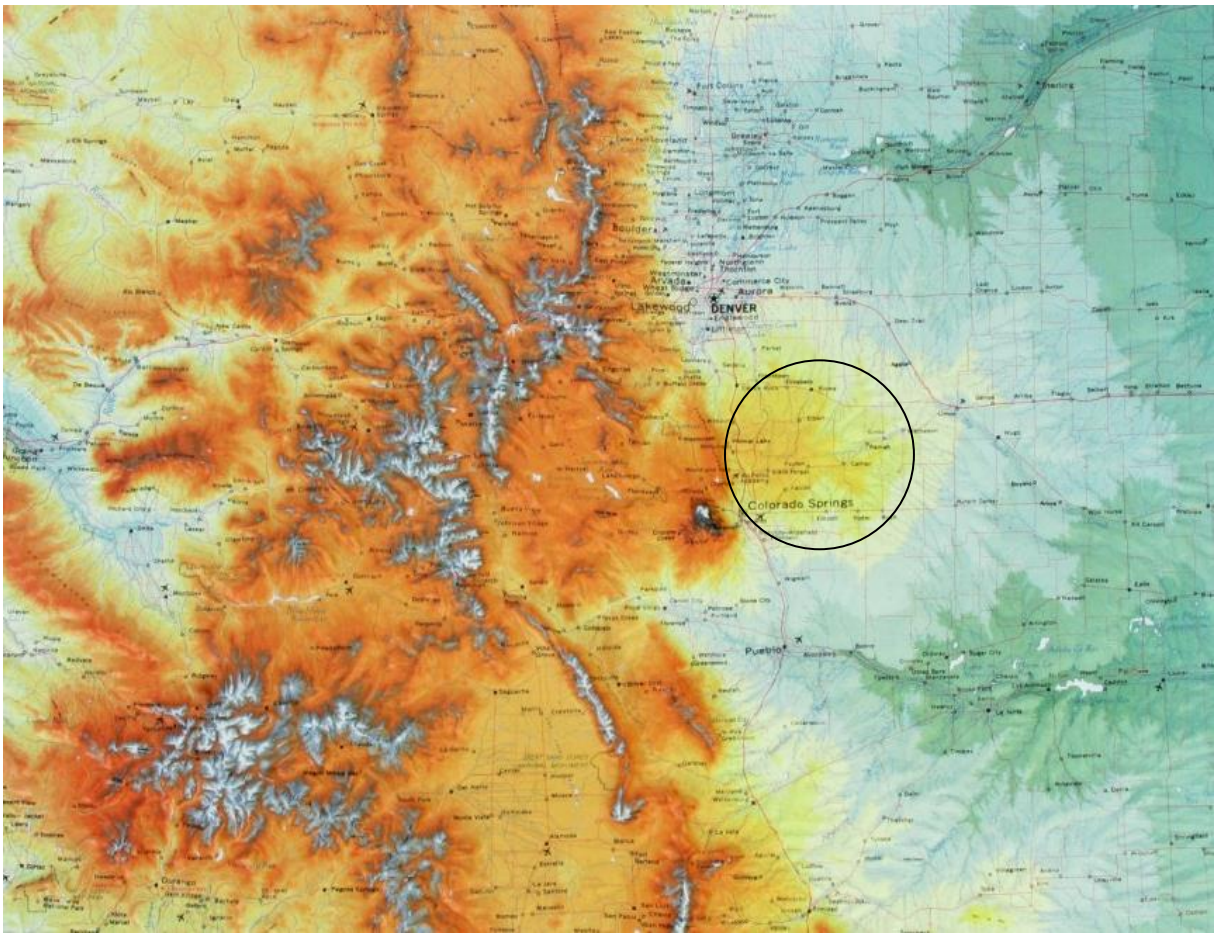
Il arrive toutefois que certaines soient produites par des orages supercellulaires et causent d'importants dégâts. D'ailleurs, les comtés du Colorado les plus souvent touchés par les tornades sont situés à l'est de l'agglomération de Denver.

Les raisons qui amènent autant de tornades à se produire au Colorado, cela principalement sur les régions du centre et de l'est, sont majoritairement dues à une situation météorologique régulièrement observée au printemps et en été.

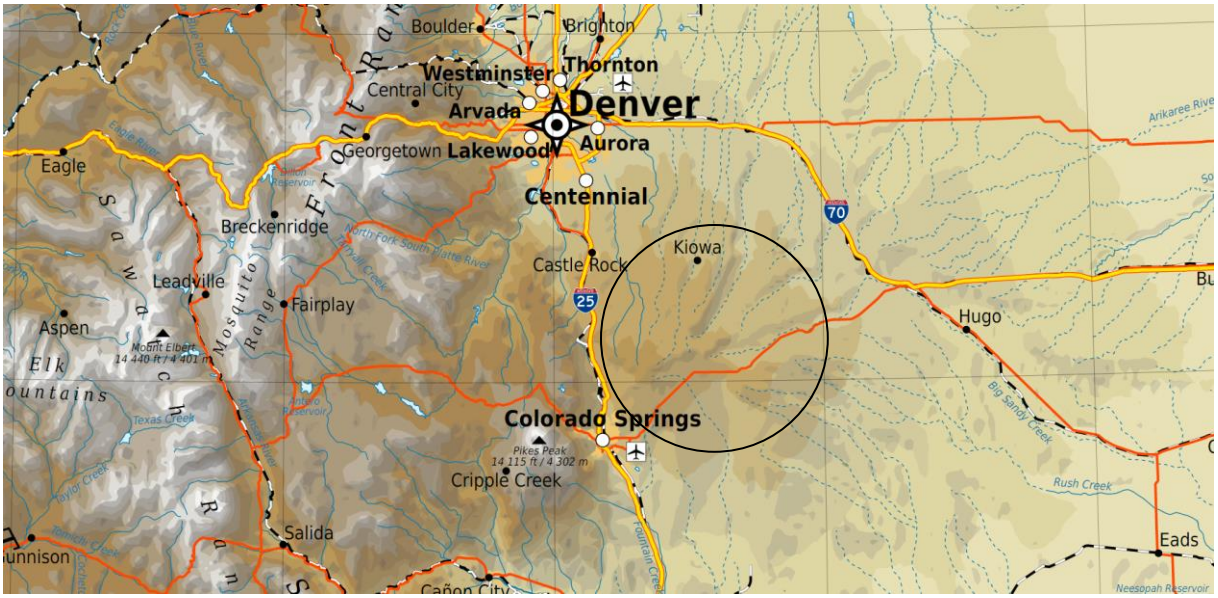
Nous reviendrons là-dessus un peu plus tard et nous verrons l'importance prise par la Palmer Divide sur la survenue des orages. Cette région en question est discutée au point suivant.

2.2. La Palmer Divide

C'est une zone de collines située juste à l'est des Montagnes Rocheuses. Elle est délimitée au nord-ouest par l'agglomération de Denver et au sud-ouest par l'agglomération de Colorado Springs. L'altitude varie entre 1600 et 2000 mètres.



Source de l'image : **https://www.mapshop.com/colorado-raised-relief-map/**



Source de l'image :
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Colorado_geographic_map-en.svg

Parmi les nombreuses bourgades situées au sein de la Palmer Divide, on peut citer Simla, qui se trouve à 1833 mètres au-dessus du niveau de la mer. C'est bien la raison pour laquelle on parle de « Hautes » Plaines pour désigner cette région. Simla est donc à une altitude plus élevée que les sommets du Jura, des Vosges ou de la Forêt Noire.

Source de l'image : **Street View**

Mais si on ne regarde que le relief de la région de Simla, on pourrait presque comparer le paysage à celui du Nord de la France ou du centre de la Belgique, avec une prédominance de vastes étendues planes ou presque. Au contraire, les

bourgades de Kiowa ou d'Elizabeth sont situées dans des zones plus vallonnées.

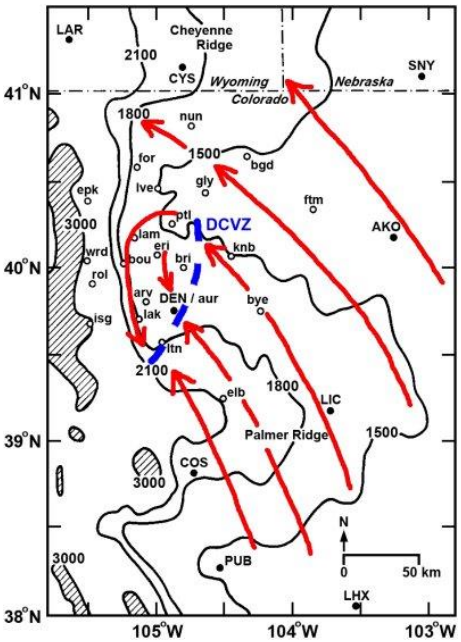
Bourgade de Kiowa – Source de l'image : **https://frontrange.8z.com/communities/whats-it-like-to-live-in-kiowa-co/**

Il ne va pas sans dire qu'une telle altitude impose un climat rude à la région, en dépit de sa latitude assez basse, en dessous du 40ème parallèle. C'est ainsi qu'en janvier, dans la région de Simla, les températures ne dépassent guère 4°C à 5°C en moyenne en journée, pour replonger jusqu'à –8°C environ la nuit. En juillet, ces valeurs sont respectivement de 30°C et de 14°C, avec une humidité relative assez basse tout au long de l'année.

Toutefois, les variations sont extrêmes. Avec le foehn (le « chinook » comme on l'appelle là-bas, qui descend des Rocheuses), les températures peuvent atteindre 25°C en pleine période de Noël aux endroits privilégiés, alors qu'une descente d'air arctique fera dégringoler le mercure jusqu'à –30°C à la même saison. L'été n'est pas davantage à l'abri de ces variations, avec des pics de chaleur jusqu'à presque 40°C malgré l'altitude, ou alors une grande fraîcheur avec des nuits froides jusqu'au cœur de l'été (températures inférieures à 5°C possibles même en juillet et août).

À la fin du printemps, de grandes différences au niveau de l'humidité et des précipitations se surimposent à la variabilité thermique, ce qui fait que les tornades restent fréquentes et que la région appartient encore à la Tornado Alley, même si la zone de risque majeur se trouve bien plus à l'est.

À présent, revenons à l'analyse d'une situation atmosphérique régulièrement rencontrée à l'est du Colorado au printemps et en été.



À cette époque de l'année, le flux d'altitude souffle le plus souvent d'ouest ou de sud-ouest en provenance des Montagnes Rocheuses. Lorsque ce courant redescend des montagnes, celui-ci s'assèche et se réchauffe par effet de foehn. Ainsi, les hauts plateaux qui bordent les Rocheuses connaissent parfois des températures très élevées.

Dans les basses couches, de l'air chaud et humide remonte du Golfe du Mexique. Celui-ci s'assèche en partie en traversant les plaines du Texas. Malgré cet assèchement relatif, cet air est encore suffisamment humide pour que des nuages se forment.

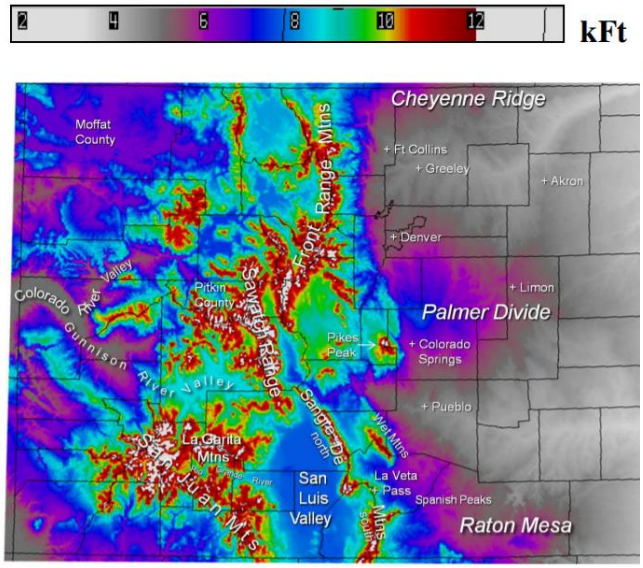
Mais c'est surtout lorsque cet air rencontre les contreforts de la Palmer Divide que des nuages convectifs peuvent se développer, et ce par effet orographique. Dans certaines situations, cet air plus sec redescendant de l'autre côté de la Palmer Divide rencontre l'air chaud et sec en provenance des Rocheuses. Il se produit alors une convergence des vents appelée « DCVZ », ou convergence de Denver. La rencontre entre ces flux différents amène le développement d'une zone de basses pressions. Cette zone de basses pressions entraine à son tour un renforcement du flux en provenance du sud-est.

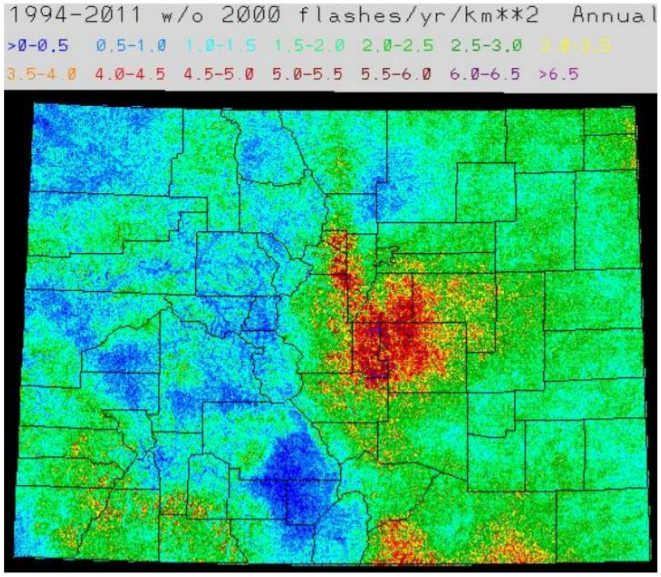
C'est sur la zone de convergence que peuvent se développer des orages parfois violents, producteurs de tornades. En effet, des zones de rotation localisées peuvent se mettre en place sur ces convergences des vents. En général, les tornades issues de ces orages ne sont pas d'origine mésocyclonique et n'atteignent pas une intensité élevée. Ces tornades se forment souvent au moment où la cellule orageuse est en pleine « explosion ».

Les orages observés sur cette région peuvent soit faire du surplace, soit se déplacer plein est ou nord-est et produire des tornades à l'est de la région de Denver. Ceci explique le nombre élevé de tornades sur ces zones.

Toutefois, si le flux à haute altitude est suffisamment puissant (courant jet), les cisaillements des vents peuvent engendrer une évolution supercellulaire de ces orages qui peuvent alors prendre une trajectoire différente. Il peut arriver dans certains cas que les orages naissant sur la Palmer Divide prennent une trajectoire plein sud. En règle générale, seules les supercellules sont capables de dévier complètement du flux directeur. Et c'est ce qui s'est passé le 4 juin 2015. La supercellule a pris naissance sur la Palmer Divide et a ensuite dévié de sa trajectoire vers le sud.

Reprenons, à présent, une carte illustrant l'activité électrique des orages entre 1994 et 2011.





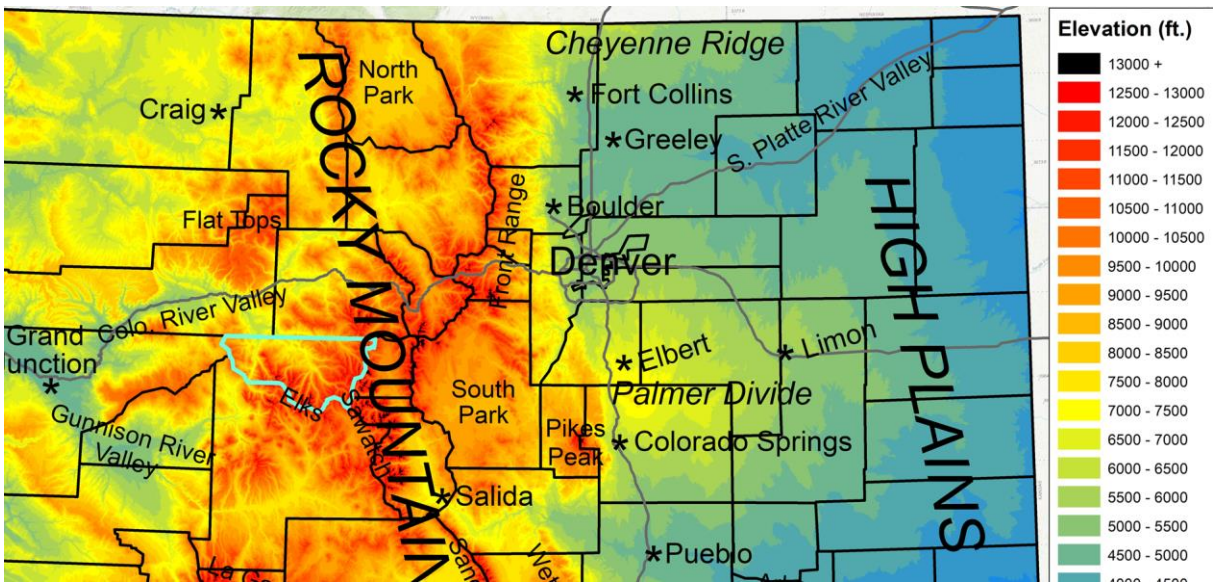
Source des images :
https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Lightning%20Climatology%20for%20the%20State%20of%20Colorado.pdf

Nous pouvons constater, sur ces cartes, l'importante activité électrique observée notamment sur les contés d'El Paso, de Teller, de Douglas et d'Elbert. Les deux derniers reprennent la Palmer Divide.

Concernant les comtés de Teller et d'El Paso, ils possèdent sur leurs territoires de hauts sommets appartenant aux Montagnes Rocheuses du Colorado. Parmi ceux-ci, le Pikes Peak qui culmine à 4301 mètres d'altitude. Ce sommet a la particularité de se situer à l'écart des dorsales montagneuses et forme un sommet isolé à l'est de la chaîne des Rocheuses. Sa position en retrait lui confère par ailleurs un climat unique.

Nous avons vu plus haut, l'importance qu'avait la Palmer Divide sur la mise en place d'une situation favorable à la survenue d'orages, parfois tornadiques. Des études récentes tendent à démontrer que la position et l'altitude du Pikes Peak pourraient influencer également le contexte météorologique favorable à la survenue d'orages.

La carte ci-dessous reprend la position du Pikes Peak par rapport à la dorsale principale qui compose les Montagnes Rocheuses.



Source de l'image : **http://nwafiles.nwas.org/jom/articles/2019/2019-JOM4-figs/Fig1.png**

On constate, en effet, que sa position est très en retrait des autres principaux sommets. En outre, les pentes du versant est sont raides. La distance entre le sommet du Pikes Peak et la région de Colorado Springs est de 19.3km. L'angle d'élévation est de 13%.

Dans une étude menée sur l'initiation de la convection par imagerie satellite, Klitch et Al. (1985) ont noté que l'initiation avait le plus souvent lieu sur le flanc est des Montagnes Rocheuses, pour peu que l'angle de pente soit important. Ce qui est le cas du Pikes Peak. Il faut dire que ce dernier étant situé aux abords immédiats des plateaux environnants, il bénéficie également d'une humidité plus importante par rapport aux sommets situés plus en retrait au sein de la chaine montagneuse.

En conséquence, l'initiation de la convection s'avère assez fréquente sur le flanc est du Pikes Peak. À cela s'ajoute la présence toute proche de la Palmer Divide, qui comme nous l'avons vu, a une importance capitale dans le développement des orages. Ainsi, les recherches menées tendent à démontrer que toute la région située entre Colorado Springs et Denver bénéficie de conditions très favorables à la survenue d'orages.

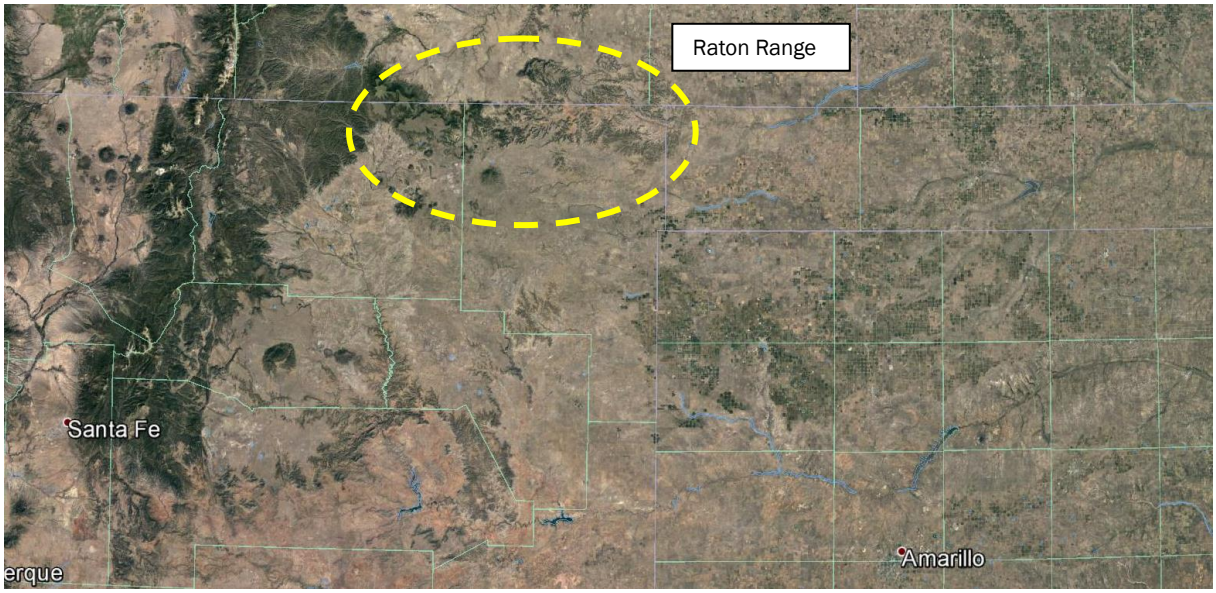
Pour rappel, nous avons survolé, dans les pages précédentes, l'importance que pouvait avoir la Palmer Divide sur le développement de la convergence de Denver (DCVZ). Comme nous l'avons vu, la présence d'une DCVZ est favorable à la survenue d'orages. Lorsque ceux-ci sont développés, ils peuvent parfois se déplacer vers le nord en bénéficiant de conditions encore plus favorables à leur intensification.

C'est par exemple ce qui s'est passé le 22 mai 2008. Une puissante supercellule avait pris naissance dans la région de Denver où une DCVZ était présente. Cet orage avait ensuite suivi une trajectoire plein nord en produisant une violente tornade d'intensité EF3 sur la région de Windsor.

Source de l'image :
https://media.9news.com/assets/KUSA/images/78d053fe-6225-4c8a-a635-f55d1b645791/78d053fe-6225-4c8a-a635-f55d1b645791_1140x641.jpg

2.3. La Raton Range

Nous avons vu l'importance de la Palmer Divide sur la survenue d'orages au Colorado. Une autre zone de relief qui joue aussi un rôle est la Raton Range. Ce chainon montagneux se situe au nord-est de l'état du Nouveau Mexique et sur le sud-est de l'état du Colorado. Son altitude varie entre 1500 et 2600 mètres. Ici, le relief est plus marqué qu'à la Palmer Divide. En effet, les dénivellations entre les sommets et les plateaux environnants sont importantes.



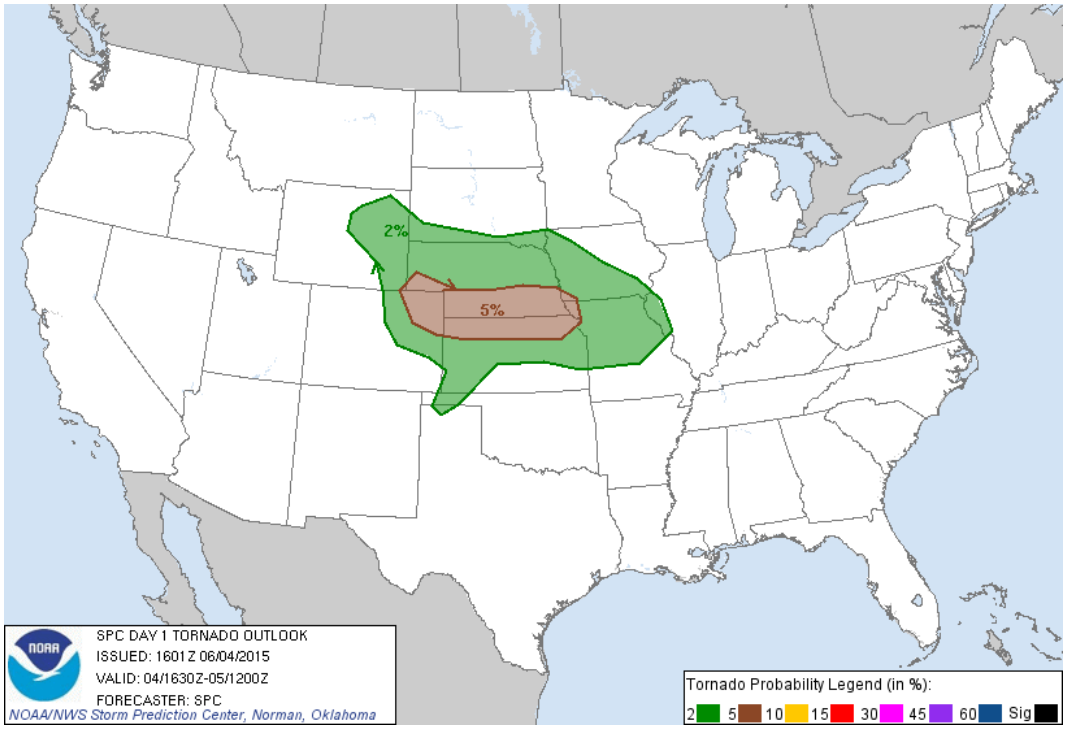
Les exemples d'orages se développant sur la Raton Range sont nombreux, certains pouvant développer des tornades. L'un des exemples les plus marquants remonte au 31 mai 2010. En effet, un orage supercellulaire a produit trois tornades très esthétiques dans la région de Pritchett et de Campo au Colorado. L'une d'entre elles était absolument magnifique comme le montre la photographie ci-dessous prise par Dean Gill.

Source de l'image : **Dean Gill**

3. Etude du contexte météorologique du 4 juin 2015

Pour commencer, voici les prévisions émises par le Storm Prediction Center en matinée du 4 juin 2015 à 16h00 Z (ou UTC) soit à 10h00 MDT, et valables pour la période du 4 juin 2015 à 10h30 MDT au 5 juin 2015 à 06h00 MDT. Les traductions ont été réalisées par les soins de Belgorage.

3.1. Prévisions du Storm Prédiction Center



Risque de tornades.
Source de l'image : **NOAA**

Risque assez présent d'orages sévères sur le sud du Nebraska, le nord du Kansas, le sud de l'Iowa et le nord-ouest du Missouri.

Risque faible d'orages sévères sur une région s'étendant du centre-nord des Hautes Plaines jusqu'à la basse vallée du Missouri.

Risque marginal d'orages sévères sur une région s'étendant des Hautes Plaines (en général) à la moyenne vallée du Missouri.

Risque marginal d'orages sévères sur certaines parties du Nevada.

Résumé

Des développements orageux sévères mais isolés se produiront sur une vaste région s'étendant des Hautes Plaines centrales et septentrionales à la basse vallée du Missouri plus tard en journée et durant la nuit.

Synoptique

Peu de changements sont attendus d'ici vendredi (5 juin) dans le patron atmosphérique général sur les États-Unis contigus (c.-à-d. les États-Unis sans l'Alaska et Hawaï). Le creux/noyau dépressionnaire sur la Californie se détachera progressivement du flux général d'ouest en se déplaçant vers le sud-sud-est sur cet État pendant qu'une crête persistera sur les Plaines centrales et méridionales. En même temps, un faible creux se déplacera lentement vers l'est sur les deux Caroline.

De nombreuses perturbations atténuées s'avanceront vers l'est-nord-est sur les Plaines centrales dans le cadre du flux contournant la crête, cependant des tendances anticycloniques se développeront sur cette région avec l'amplification de la crête située à l'avant du creux californien.

Dans les basses couches, un faible front froid s'avançant vers le sud-est au-dessus du centre-nord des Plaines et de la haute vallée du Missouri renforcera un front existant, également composés de pseudo-fronts d'origine orageuse, s'étendant du centre-nord des Hautes Plaines au nord du Kansas.

Cette zone barocline renforcée constituera le principal moteur pour le développement d'orages sévères plus tard dans la journée et durant la nuit.

Prévisions pour le centre/nord des Hautes Plaines et la basse/moyenne vallée du Missouri

Des orages à base élevée, liés à une advection d'air chaud et sévissant encore sur le nord du Kansas et le nord-ouest du Missouri, persisteront sans doute jusqu'à midi. Le risque isolé de grêle et de rafales éventuellement destructrices diminue toutefois peu à peu. Des résidus de pseudo-fronts liés à d'anciens flux sortants, ainsi que l'ascendance forcée d'un flux d'est vers les Hautes Plaines permettront cependant de nouveaux développements orageux sur les Plaines centrales en fin d'après-midi, favorisés par le réchauffement en surface.

L'humidité, dans cette région, a quelque peu augmenté au cours des derniers jours, notamment sur les deux-tiers orientaux de la « zone à faible risque », avec des quantités d'eau précipitable qui continueront à tourner autour d'un petit 40 mm au-dessus du nord-est du Kansas et de l'est du Nebraska. En association avec une épaisse couche instable persistant à moyenne altitude (au-dessus d'une inversion), la convection pourrait devenir explosive à partir du milieu ou de la fin de l'après-midi.

À ce moment, la MLCAPE pourrait atteindre 3000 J/Kg et la SBCAPE, 3500 J/Kg au-dessus du centre et du nord du Kansas et sur une grande partie du sud du Nebraska, du moins là où il n'y a pas trop de nuages résiduels des orages précédents. Des valeurs de MLCAPE supérieures à 2000 J/Kg pourraient aussi concerner la Panhandle du Nebraska et le nord-est du Colorado.

Bien que les cisaillements 0-6 km resteront plutôt modérés avec des valeurs autour de 15 m/s, cela pourra être suffisant pour engendrer des orages supercellulaires vu les fortes poussées convectives. Ceux-ci seront à même de produire de très gros grêlons et, localement, des rafales dévastatrices voire l'une ou l'autre tornade.

Ce risque de tornade pourrait être le plus marqué dans le voisinage de flux humides de basses couches tendant à revenir de l'est et parfois renforcés par les restants de pseudo-front qui traînent encore ici et là. Ce risque de tornade sera également plus marqué au nord-est du Colorado, au sud-ouest du Nebraska et au nord-ouest du Kansas, cette fois en raison des ascendances forcées liées aux vents soufflant vers les Hautes Plaines.

Dans les régions situées plus au sud-ouest, des orages isolés seront attendus plutôt en fin de journée, avec là aussi un risque de gros grêlons voire de tornades et ce, le long de la dépression orographique et d'une dry line orientée NNE/SSW, s'étendant de l'ouest du Kansas à l'ouest du Texas et à l'extrême est du Nouveau Mexique.

Le soir, les orages au nord du Kansas et au sud du Nebraska tendront à fusionner pour former un ou deux MCS de taille importante, qui se développeront en se déplaçant vers l'est-sud-est pour affecter le sud-ouest de l'Iowa et le nord du Missouri plus tard dans la nuit. Certains segments du MCS pourraient se propager en avant et former des échos en arc avec risque local de rafales destructrices et de fortes chutes de grêle le vendredi (5 juin) aux petites heures. En outre, l'une ou l'autre zone d'orages à base élevée pourrait voir le jour au-dessus du nord-est du Nebraska et se déplacer en se renforçant vers le nord-ouest et le centre de l'Iowa. Cependant, le risque de grêle et de rafales sera, là, plus limité.

Centre et nord du Nevada cet après-midi et ce soir

Des orages à évolution diurne, à base relativement élevée, pourraient se former ici et là avec risque de fortes rafales et faible risque de gros grêlons. Ils sont liés au renforcement des courants de sud-sud-ouest à l'avant de la dépression d'altitude sur la Californie.

3.2. Situation atmosphérique réelle

Les événements de Simla nous ont appris que la principale zone à risque tornadique, selon les prévisions, était située au nord-est par rapport à ce qui s'est produit réellement. En outre, l'accent était mis sur le risque de rafales descendantes et de gros grêlons, avec accessoirement un risque de tornades. Nous retrouvons cela de façon plus détaillée dans les « Mesoscale Discussions » de 11h46 MDT, qui sont des prévisions à très court terme émises par le Storm Prediction Center et qui se font à un échelon plus régional (c'est-à-dire à « échelle moyenne »).

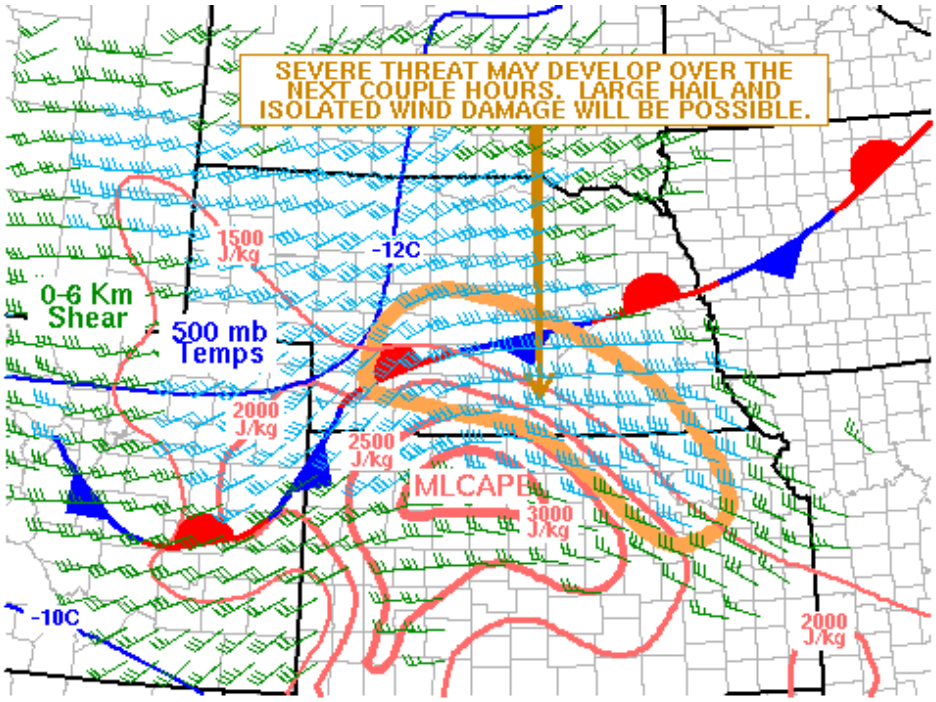
Voici la traduction de ces prévisions, également réalisée par les soins de Belgorage.

« Une situation à haut risque pourrait se développer sur le centre et le sud du Nebraska durant les prochaines heures. Les cellules les plus vigoureuses sont à même de produire de gros grêlons et des rafales destructrices. Les dernières analyses en surface révèlent un front quasi-stationnaire s'étendant de l'est du Colorado au centre-nord de l'Iowa en passant par le centre-sud du Nebraska. Les points de rosée dans la zone proche de ce front sont de l'ordre de 16°C à 18°C, alors que la prévision des températures de surface a dû être revue en raison de la présence d'un pseudo-front lié aux flux sortants d'orages matinaux.

Un certain nombre de cellules se sont récemment formées dans le Comté de Lincoln, au Nebraska, dans la zone d'intersection entre le front et un flux qui se renforce dans les moyennes couches. Ceci est la cause d'un important cisaillement 0-6 km qui approche les 40 nœuds. Cet environnement cisaillé, accompagné d'une instabilité suffisante, permet le développement de supercellules, même si leur base reste assez élevée en raison d'une couche d'air relativement frais en dessous de l'inversion.

Le risque de fortes rafales reste limité, mais le danger de gros grêlons est bien présent, surtout en dessous de cellules avec mouvement rotatoire.

Plus au sud-est, des orages violents sont en cours au Kansas, du côté nord-est de cet État. Cette activité est associée à une instabilité augmentant graduellement vers le sud-est et aux restants d'un vieux pseudo-front orageux. Ces orages vont cependant être contrariés par des ascendances de plus en plus faibles et la présence de plus en plus marquée d'une inversion. Malgré cela, des violentes rafales et de la grêle restent possibles, même si c'est de façon isolée. »

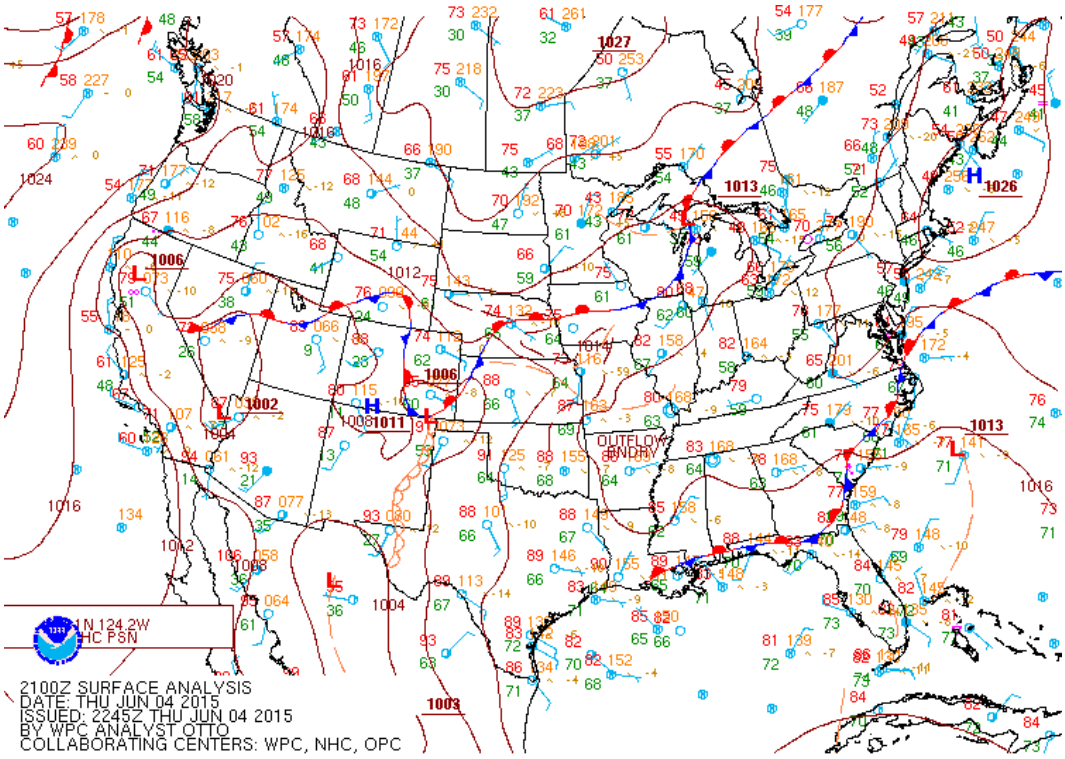


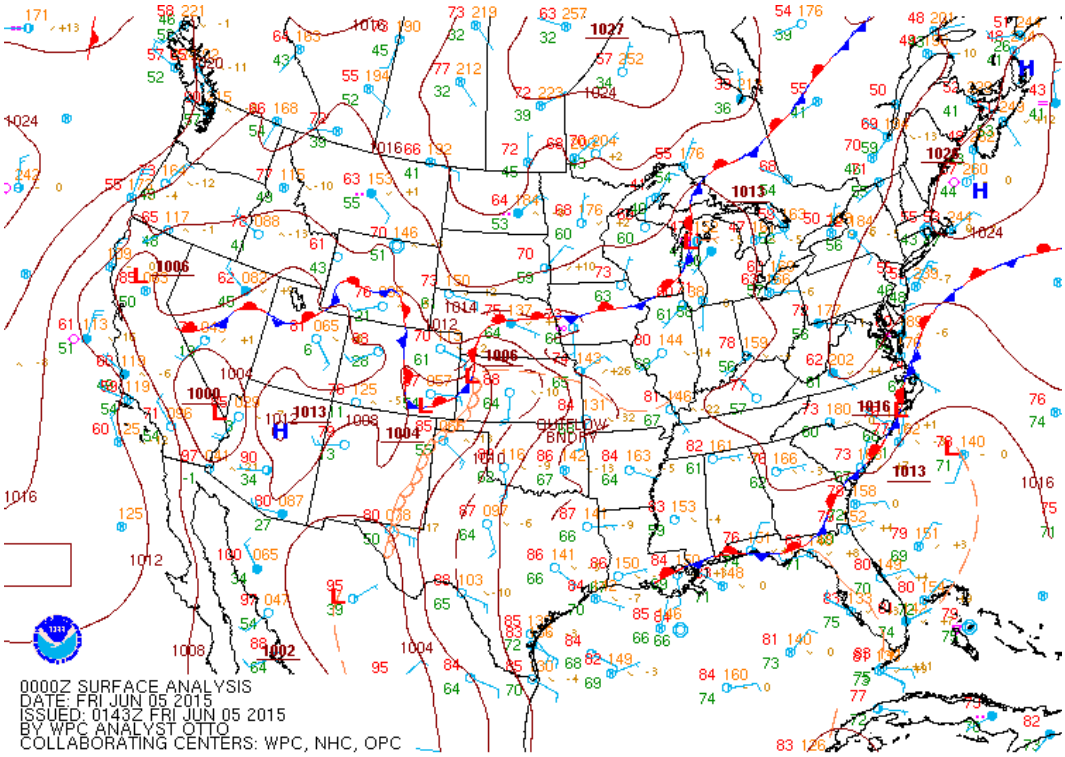
SPC MCD #0885

Source de l'image : **Storm Prediction Center**

Tous les indicateurs annoncent donc le gros des orages plus à l'est. Et même si cela se concrétise assez bien aux endroits prévus, l'essentiel de l'offensive n'est pas là, mais à Simla, avec un développement de tornades qui est vraiment extraordinaire !

Avant de chercher des explications, nous allons d'abord recadrer la carte ci-dessus par rapport à la situation atmosphérique générale sur les États-Unis, analysée à 12h00 et à 15h00 MDT (cartes de la page suivante).



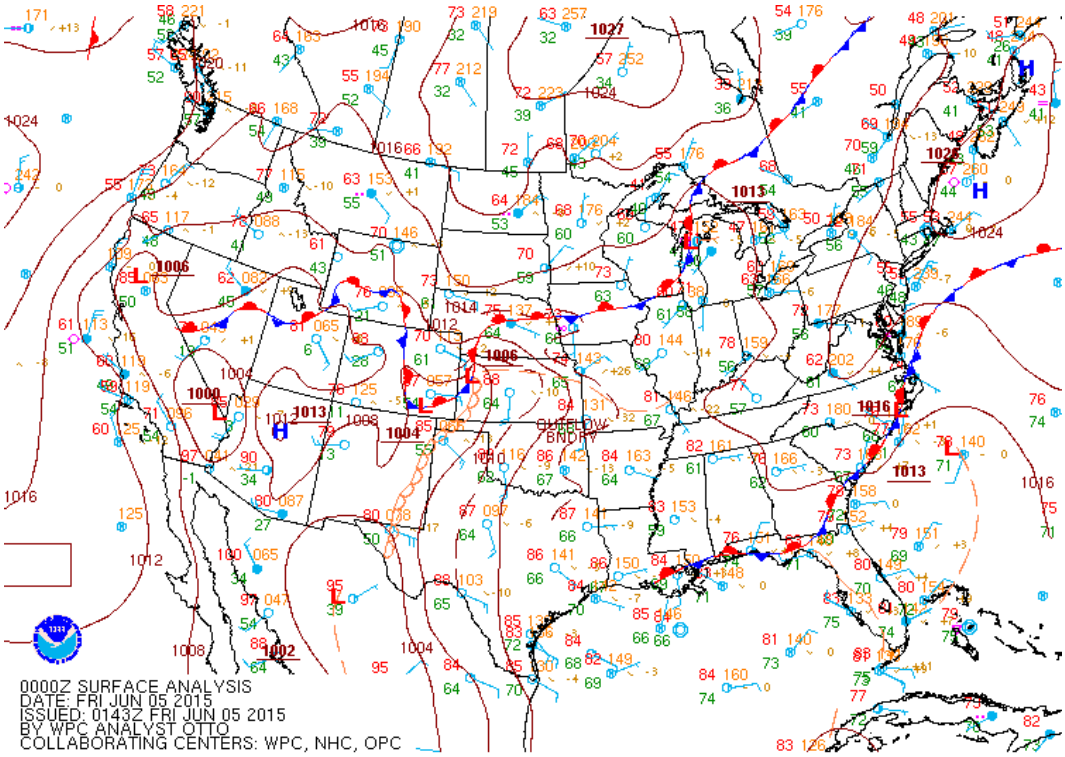


Source des images : **NOAA**

Nous retrouvons bien, ici, le front présent sur le Colorado, mais aussi sur le nord-est du Kansas, sur le Nebraska et l'Iowa. En fait, il s'agit d'un véritable enfoncement d'air froid sur la moitié orientale du Colorado, avec un front courbe qui ne bouge pratiquement pas. Cette situation, d'ailleurs, existait déjà la veille soit durant le 3 juin 2015.

Et la veille en effet, le temps était gris, humide et trop frais pour la saison, avec de nombreux stratocumulus, persistant longtemps, et des nuages d'instabilité l'après-midi, accompagnés d'une activité orageuse se concentrant surtout autour de Denver. Mais le 4 juin, l'air présent dans ce renfoncement s'est tellement réchauffé que la différence de température, par rapport aux autres masses d'air, ne se ressentait plus qu'à peine.

Revoyons la dernière carte d'analyse.



Source de l'image : **NOAA**

À l'est de la descente d'air froid – ou plutôt ancienne descente d'air froid –, nous avons la typique remontée d'air chaud et humide originaire du Golfe du Mexique, accompagnée d'infiltrations d'air plus sec formant la célèbre « dry line », bien visible sur la carte ci-dessus.

.

À Dodge City au Kansas, l'air est en effet chaud et humide (33°C), mais le temps lumineux avec quelques cirrus et altocumulus, et des nuages convectifs à partir du milieu de l'après-midi, se développent ici et là, ces derniers allant jusqu'au stade de cumulonimbus. À Johnson City, également au Kansas (mais plus à l'ouest), nous retrouvons le même type de temps avec, cependant, des incursions d'air sec (dry line) et un maximum montant jusqu'à 35°C. Le front et la dry line, qui formeront le fameux « triple point », sont cependant trop affaiblis pour générer des orages véritablement violents.

À l'ouest de l'ancienne descente d'air froid, nous avons un air chaud et très sec, d'origine désertique, avec un ciel serein ou garni de cumulus aplatis et l'apparition de cirrus spissatus le soir. Les températures, au fond des vallées des Rocheuses, atteignent 25°C environ.

Dans l'ancienne descente d'air froid, le temps est d'abord brumeux, avec des stratus évoluant en cumulus/stratocumulus avant de se dissiper pour laisser la place à de très belles éclaircies en matinée. Puis, on note la formation de cumulus l'après-midi, se développant ou non en orages selon les endroits. Les températures atteignent le plus souvent des valeurs de 26°C/28°C.

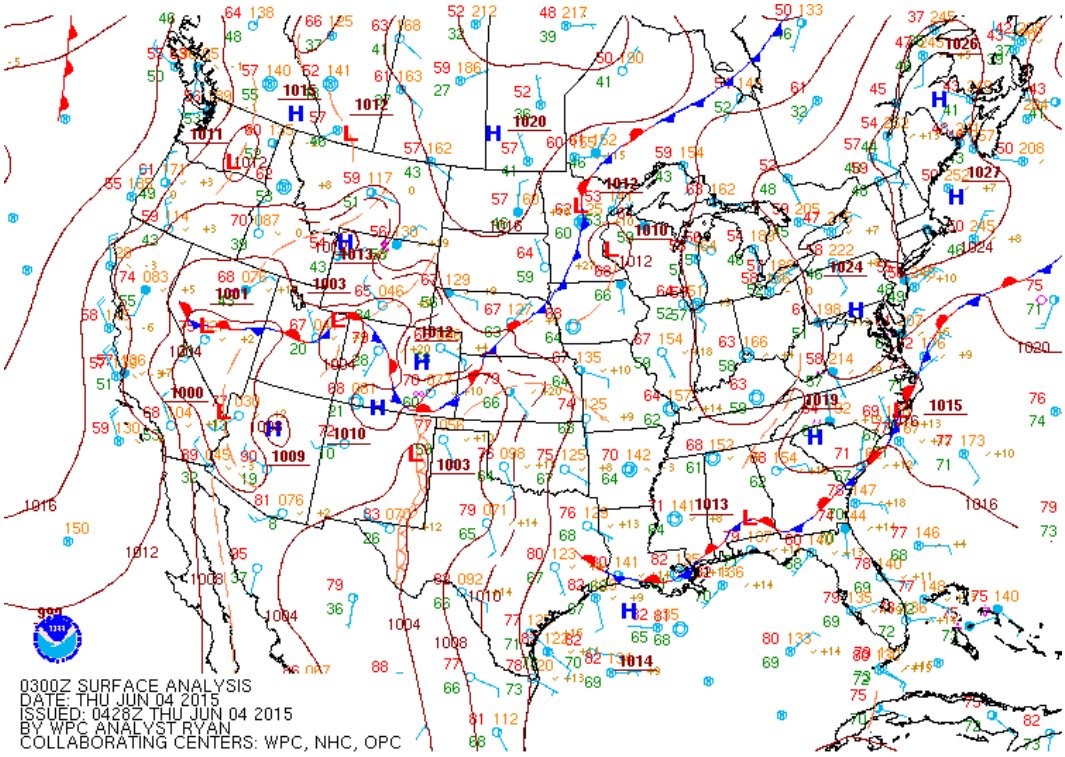
À première vue, les trois masses d'air semblent présenter des températures très différentes, mais il ne faut pas perdre de vue les grandes différences d'altitude qu'il y a dans la région. À l'ouest du Kansas (Dodge City, Johnson City), la plaine (faisant encore partie des Grandes Plaines) se situe autour de 800/1000 mètres d'altitude.

Au Colorado, où il est déjà question de Hautes Plaines, l'altitude est souvent de 1500/1800 mètres, tandis que les vallées dans les Rocheuses se trouvent fréquemment à des altitudes largement supérieures à 2000 mètres. Si l'on corrige ces effets de l'altitude, on se rend compte que les trois masses d'air ont des températures presque similaires.

D'un autre côté, la grande disparité dans l'humidité est également liée à la géographie locale : plus on s'enfonce dans la chaîne de montagnes des Rocheuses, plus l'air est sec. Et nous allons bientôt voir que ces éléments de climatologie locale ont pu jouer un grand rôle dans la formation de l'orage producteur de tornades près de Simla.

3.2.1. Analyse météorologique à très petite échelle.

Comme déjà dit dans la partie consacrée à la situation atmosphérique réelle, l'enfoncement d'air froid, entouré d'un front quasi-stationnaire, s'était surtout fait ressentir la veille (3 juin), avec un temps gris, humide et trop frais accompagné de nombreux stratocumulus, et la présence de nuages d'instabilité surtout autour de Denver, où éclatent des orages en fin d'après-midi et en soirée.



Source de l'image : **NOAA**

Ce mauvais temps de la veille a été responsable, le 4 juin 2015, d'un surplus d'humidité dans la région entourant Simla, avec de nombreuses brumes voire du brouillard, évoluant ensuite en stratus, stratocumulus puis cumulus avant de se disperser en début ou milieu de matinée.

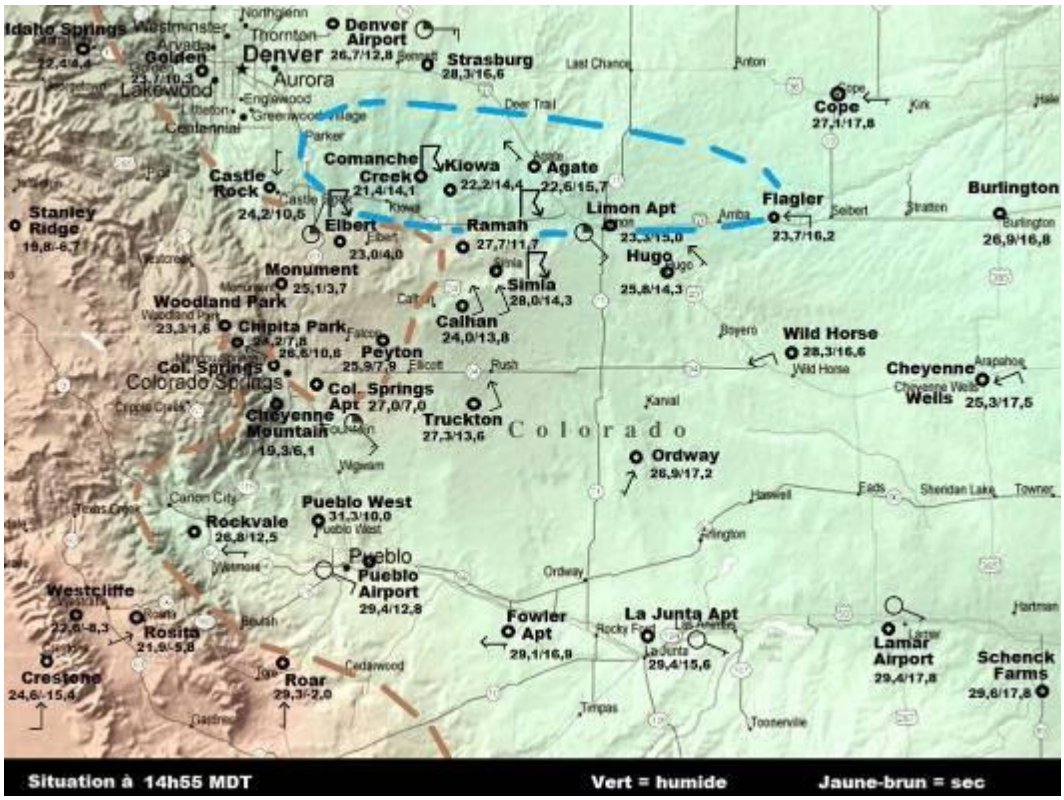
Mais du front stationnaire, il ne reste pratiquement rien. Sa branche orientale est devenue complètement perméable et on peut parler d'un flux général d'est à sud-est qui affecte la quasi-totalité des Hautes Plaines du Colorado avant de venir buter contre les Montagnes Rocheuses. Il s'agit d'un air chaud et humide ayant une lointaine origine au Golfe du Mexique. Cependant, le long parcours sur les terres arides fait qu'en journée, cet air se desséchera quelque peu, tout en gardant suffisamment d'humidité pour maintenir un potentiel orageux sur la région.

D'un autre côté, la branche occidentale du front se confond désormais avec une « dry line » naturelle, formée par le Front Range, une chaîne de montagnes formant le bord oriental des Montagnes Rocheuses et séparant l'air très sec des plateaux semi-désertiques à l'ouest de l'air moins sec des Hautes Plaines à l'est.

En ce 4 juin 2015, la dry line n'épouse cependant pas parfaitement les limites du Front Range, avec des enfoncements d'air humide au niveau de Pueblo et des renflements d'air sec débordant des plateaux semi-désertiques au sud de Denver.

Nous pouvons voir aussi, au symbole d'orage présent sur la carte, qu'une première cellule s'est développée juste au nord de cette avancée d'air sec, sur la Palmer Divide.

Notons d'abord, cependant, que dans la langue d'air sec, les brumes et stratus matinaux font très rapidement place à un ciel tout à fait serein et une visibilité devenant très bonne, alors qu'au nord de cette langue d'air sec, les cumulus issus de l'évolution diurne des stratus et stratocumulus matinaux ont tendance à persister, d'abord sous une forme humilis en matinée avant de se développer de façon explosive en début d'après-midi pour former plusieurs cellules juste au nord de la zone sèche (où des cumulus finiront par se former aussi, mais avec un développement beaucoup plus limité).



Ces cellules orageuses vont créer un « outflow » d'air humide et plus frais sur une zone assez étendue et mettre en place un pseudo-front froid (symbolisé par la ligne discontinue bleue sur la carte) tandis que le versant sud du complexe orageux continue à attirer l'air sec (dont la limite est symbolisée par la ligne discontinue brune sur la carte).

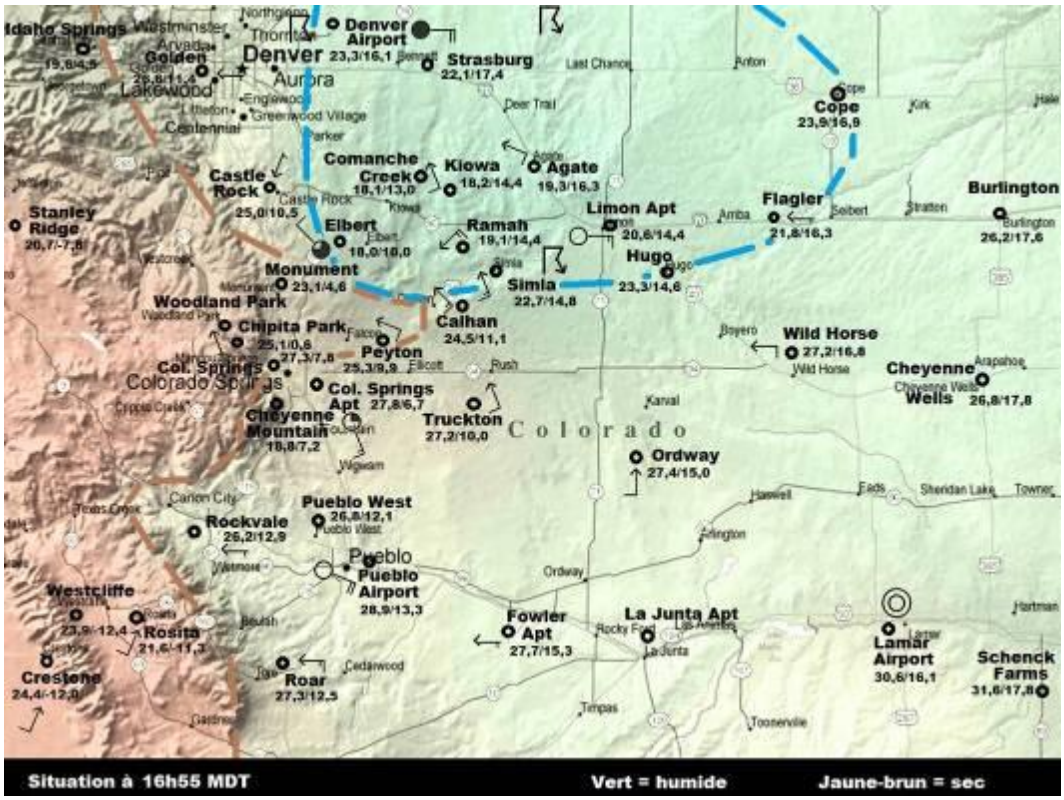
Toutefois, si on regarde bien les températures et les points de rosée, nous sommes très loin d'une situation extrême avec plus de 20°C de différence dans les points de rosée. C'est bien plus modeste ici, et les contrastes thermiques n'ont rien de remarquable non plus. On peut véritablement parler d'une situation un peu « molle », et les orages tendent déjà à se déstructurer quelque peu.

Le schéma global, par contre, ne parvient pas à être bousculé et, au fil des heures, les contrastes thermiques se renforcent même en raison d'une baisse plus prononcée des températures dans les zones à précipitations.

Nous assistons ici à une mise en place d'une véritable tripartition de l'atmosphère, avec au nord de Simla de l'air frais et très humide, délimité par un pseudo-front actif surtout dans sa partie méridionale, mais avec formation de quelques cellules orageuses aussi du côté nord. Au sud de Simla, nous avons la masse d'air chaud et modérément humide en provenance du Golfe de Mexique et, un peu plus loin vers le sud-ouest, toujours la présence de la bulle d'air sec.

N'oublions pas que les températures de 27°C à 30°C observées en bien des endroits peuvent être considérées comme assez élevées au vu de l'altitude de ces Hautes Plaines, comprise entre 1500 et 2000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Normalement, dans cette région à cette saison, les températures maximales tournent autour d'un petit 25°C.

Alors que dans la plus grande partie des Plaines du Colorado, les nuages à évolution diurne restent modestes, avec formation de quelques congestus ou cumulonimbus avec virga, voire de faibles averses, notre système orageux, dont notamment la supercellule de Simla, résiste malgré certains signes de faiblesse, et semble même reprendre du poil de la bête. Pendant ce temps, la zone de l'outflow (flux sortant) prend de l'extension et touche à présent la zone de l'air sec.



Nous voyons à présent qu'une sorte de « triple point » en miniature s'est formé quelque part à l'ouest de Calhan, à une bonne trentaine de kilomètres à l'ouest-sud-ouest de Simla.

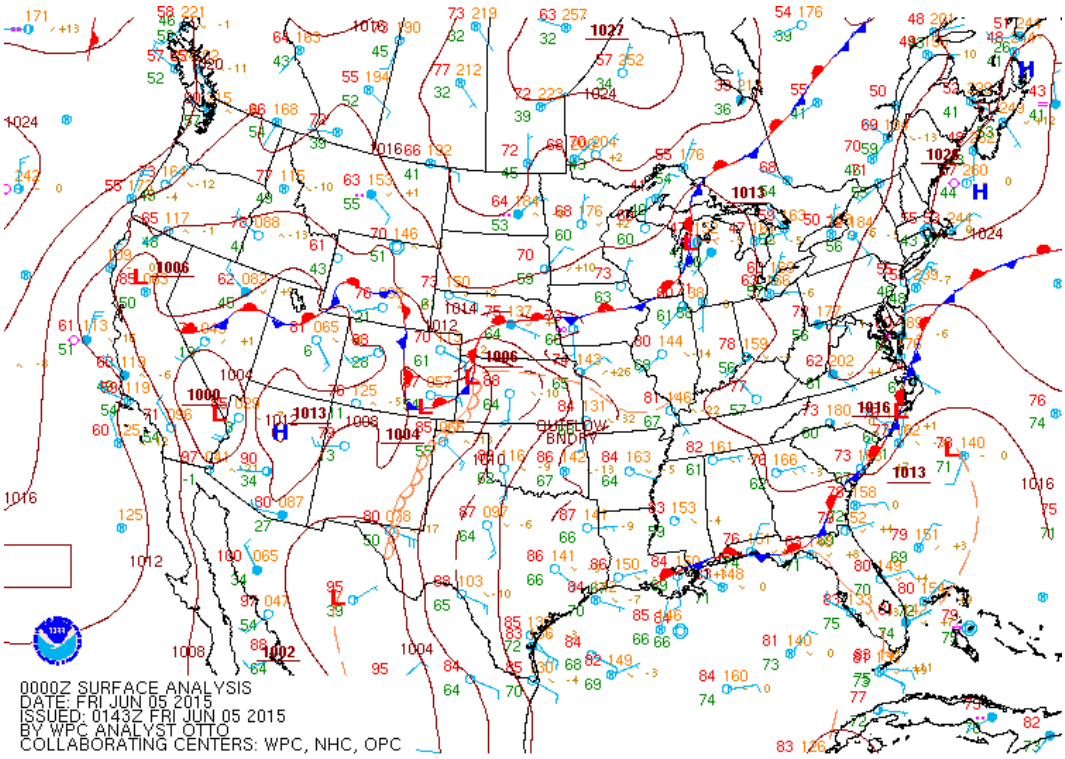
En sachant qu'en pareil cas, cet air sec, sous forme de couche sèche, va se retrouver à quelques altitudes au-dessus de Simla, il n'est pas étonnant que la supercellule reprenne de la vigueur juste à ce moment-là, avec un nouveau nuage mur qui vient remplacer celui qui était en train de se déstructurer. Et en peu de temps, cette supercellule deviendra tornadique, avec la formation de non moins de huit tornades !

Un coup d'œil sur les sondages atmosphériques de Denver nous permet de constater aussi que les conditions de cisaillement semblaient idéales, avec un vent soufflant en moyenne de sud-est en surface (avec une zone de convergence sur le pseudo-front) et de sud-ouest dans les couches moyennes et élevées de l'atmosphère, avec une dynamique bien présente, mais pas trop forte, de telle manière qu'elle n'écrête pas le cumulonimbus.

Notons enfin la très forte décroissance des températures avec l'altitude dans les couches moyennes, avec des gradients montant jusqu'à 0,9°C par 100 mètres entre 3000 et 5000 mètres d'altitude.

Avec le réchauffement diurne, l'instabilité des basses couches est devenue à son tour très importante. L'existence ou non d'une inversion dans les couches moyennes est difficilement démontrable en l'absence de sondage réalisé sur place au bon moment, mais d'après le développement des nuages, il semblerait bien qu'un léger « couvercle » ait existé, ralentissant un instant la convection et la rendant plus explosive par la suite. Mais ce qui a surtout « boosté » la supercellule tornadique, c'est la situation très complexe laissée par des orages précédents.

En tous cas, ceci montre une fois de plus le côté imprévisible des éléments. Nous avions en fait un front, et une véritable « dry line » au sud de ce front, s'étendant du sud-ouest du Kansas à l'extrême ouest de l'Oklahoma, puis descendant plus ou moins le long de la frontière entre le Texas et le Nouveau Mexique.



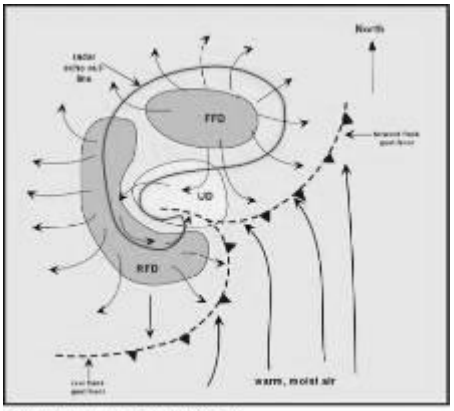
Source de l'image: **NOAA**

Un beau « triple point » était à l'ordre du jour quelque part sur l'ouest ou le nord-ouest du Kansas, avec un risque accru d'orages de ce côté-là, ou alors plus au nord, sur le front même au Nebraska. Mais ce front, en fin de compte, s'est affaibli et ce sont des phénomènes locaux qui ont pris le relai, pour produire à Simla des phénomènes tornadiques parmi les plus extraordinaires que l'on puisse connaître aux États-Unis.

4. Formation des tornades et l'importance du RFD (ou courant descendant de flanc arrière) dans la survenue de celles-ci

On sait dorénavant que la seule présence d'un mésocyclone n'est pas suffisante pour permettre à des tornades de se développer. La présence d'un mésocyclone garantit une rotation d'ensemble du courant ascendant mais cette rotation en elle-même ne semble pas suffisante pour permettre le développement d'une tornade. Celle-ci dépend en effet des conditions présentes dans les premières centaines de mètres au-dessus du sol.

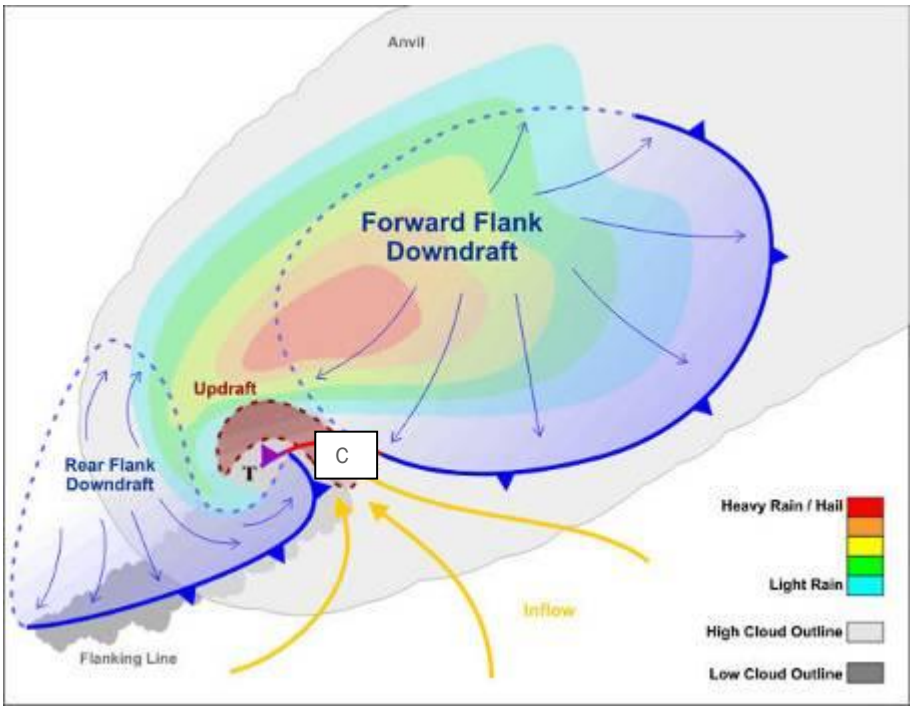
Il est avéré que les précipitations issues des courants descendants ont une importance considérable sur la tornadogenèse. En effet, l'air acheminé par les courants descendants est froid et (généralement) humide. La zone de contact entre cet air froid et l'air plus chaud acheminé par le courant ascendant crée des pseudo-fronts comme le montre le schéma ci-après.



Courtesy of the American Meteorological Society

Source : **American Meteorological Society**

Ces forts contrastes thermiques sont bien sûr présents dans la zone de contact entre les précipitations issues du courant descendant de flanc avant, du courant descendant de flanc arrière et de l'air environnant aspiré par le courant ascendant (l'inflow (C)).



Source : **NOAA**

Lors du développement du RFD (ou courant descendant de flanc arrière), l'air qui descend à l'arrière du courant ascendant est froid mais aussi généralement sec. Mais le mot « froid » est à relativiser. En effet, en redescendant, l'air issu des hautes couches va se réchauffer par détente adiabatique. La pression augmente alors que l'altitude diminue ce qui a pour effet de réchauffer les particules d'air. Le RFD qui survient peut être ainsi bien moins froid par exemple que le FFD.

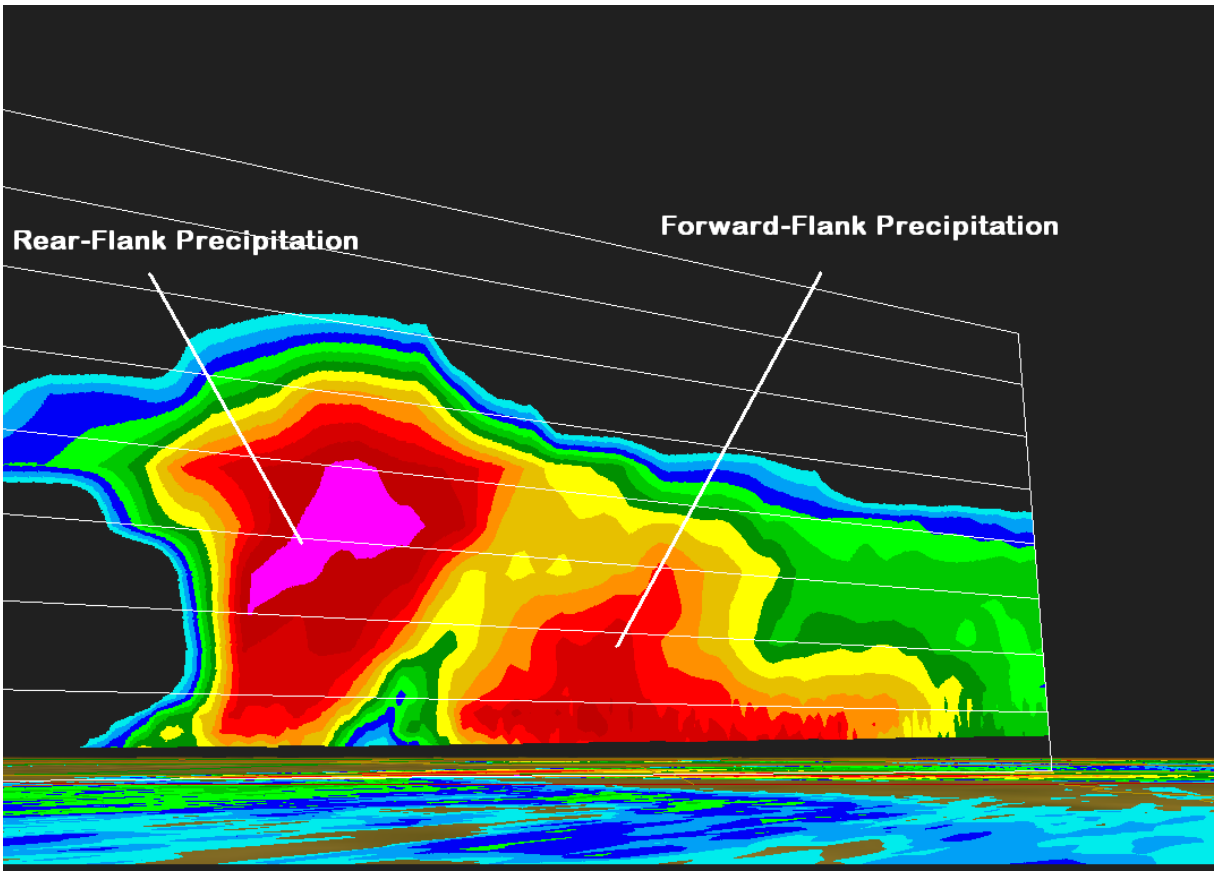
Mais le RFD peut également être plus humide. Si les couches d'air que traverse le courant descendant sont humides, la présence de cette humidité soustrait de la chaleur ce qui limite le réchauffement du RFD, l'air humide se réchauffant moins vite que l'air sec. Le RFD qui survient est dès lors plus froid et plus humide.

En outre, l'air froid et très humide issu du FFD peut, dans certains cas, contourner le courant ascendant.

Ces particules d'eau et de glace viennent rejoindre celles du RFD en rendant la zone de contact entre le courant descendant et la zone d'aspiration du courant ascendant encore plus propice à une accentuation de la vorticité horizontale. Cette vorticité étant ensuite basculée verticalement par l'aspiration du courant ascendant. La tornade pourra dès lors naître, voire se renforcer dans cette zone qui est spatialement réduite.

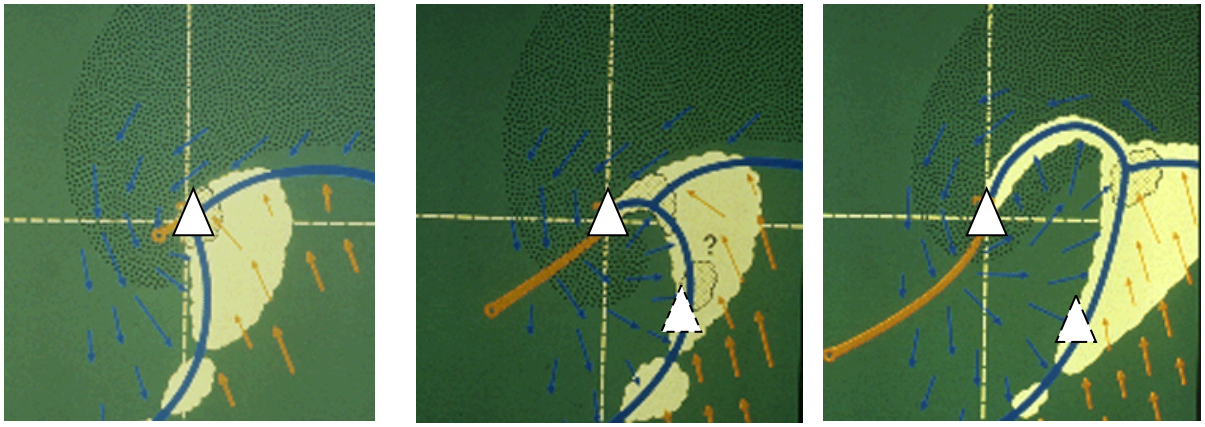
Mais attention. La survenue d'un courant descendant de flanc arrière trop « froid » peut avoir un effet néfaste non seulement sur le développement d'une tornade, mais aussi sur une tornade déjà formée. En effet, l'air froid étant plus lourd et statique que l'air chaud, celui-ci résiste au soulèvement induit par le courant ascendant ce qui amène cet air à entourer la tornade et à l'affaiblir considérablement.

L'image ci-après reprend une coupe transversale d'un orage supercellulaire. Les plus fortes réflectivités sont observées non seulement à l'emplacement du RFD, mais aussi plus en altitude. Cela dénote un courant ascendant extrêmement puissant.



Source de l'image :
https://www.e-education.psu.edu/meteo3/l9_p9.html

Reprenons un schéma montrant l'évolution théorique du RFD (pointillés), la position théorique d'une tornade (triangle blanc) mais aussi la position possible de tornades à d'autres endroits (triangle blanc en pointillés).



Source des images : **http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/torn/dgr/evsch.rxml**

Sur la première image, le RFD s'intensifie. A ce moment là, la zone de contact entre l'air issu du RFD et l'environnement immédiat est la plus propice à la survenue d'une tornade car c'est à cet endroit que la vorticité est la plus marquée.

Sur la seconde image, le RFD commence à enrouler la zone de rotation. La zone de contact s'étend au sud de la zone de rotation principale. Cet endroit peut à son tour connaitre la survenue de nouvelles tornades car la vorticité s'y accentue également. Par ailleurs, les tourbillons qui s'y forment sont très souvent anticycloniques.

A noter que sur les schémas, la position des triangles en pointillés est purement illustrative. Il se peut en effet que des tornades se développent plus au nord ou plus au sud. En fait, les recherches tendent à démontrer que les tornades à rotation anticycloniques se développent sur le flanc sud de la zone de contact entre le RFD et l'air environnant.

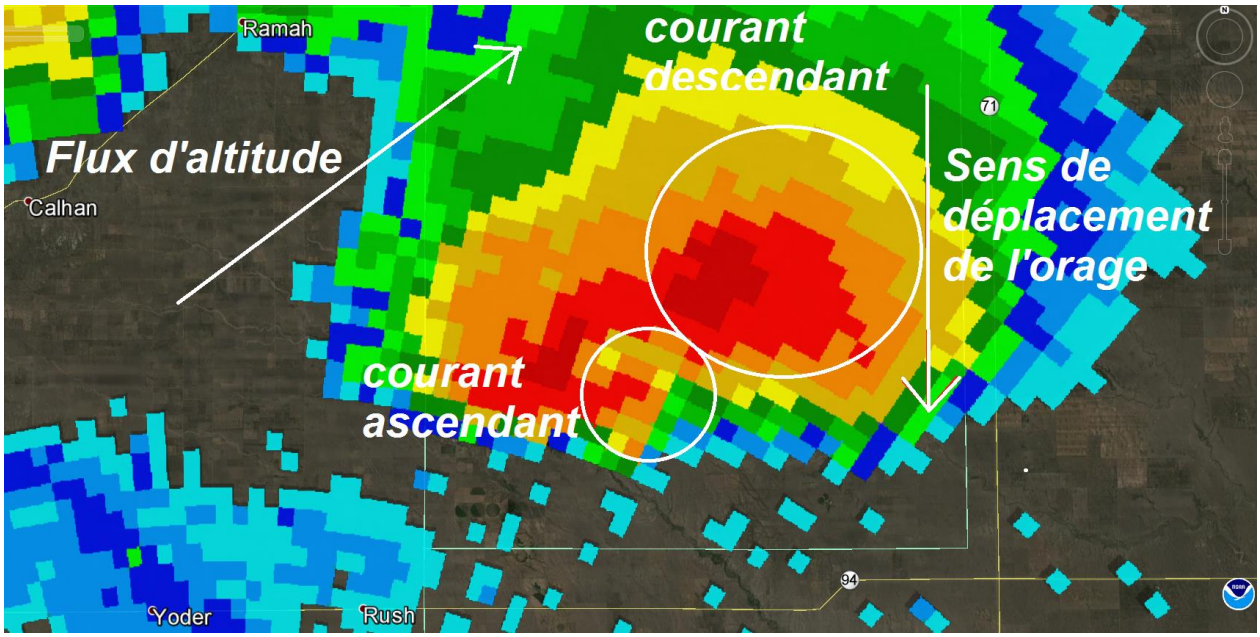
Enfin, sur la dernière image, le RFD a complètement entouré la zone de rotation principale et amène le déclin de la tornade. Par contre, si la vorticité est toujours bien présente dans la zone de contact, des tornades à rotation anticycloniques peuvent continuer de se produire.

Revenons à présent un instant sur la formation des tornades et sur l'importance qu'a pu avoir le sens déplacement de la supercellule sur la survenue de celles-ci.

Comme nous l'avons vu plus haut, le mésocyclone à lui tout seul ne suffit pas à la formation d'une tornade. Il faut qu'une importante vorticité soit également présente au plus proche de la zone de contact entre le RFD et la base du mésocyclone. Cette vorticité peut être accrue si l'orage se déplace à contre flux. La supercellule de Simla adoptait cette caractéristique, en se déplaçant plein sud, voire parfois sud à sud-est tandis que le flux de basses couches provenait du sud-est et le flux directeur du sud-ouest. Ce déplacement à contre flux a très certainement eu une importance capitale dans le développement des tornades.

Dans les situations « habituelles », les précipitations du courant descendant sont rejetées à l'avant de l'orage, selon la direction du flux d'altitude. Ainsi, on retrouve le courant descendant principal à l'avant de la cellule et le courant ascendant à l'arrière.

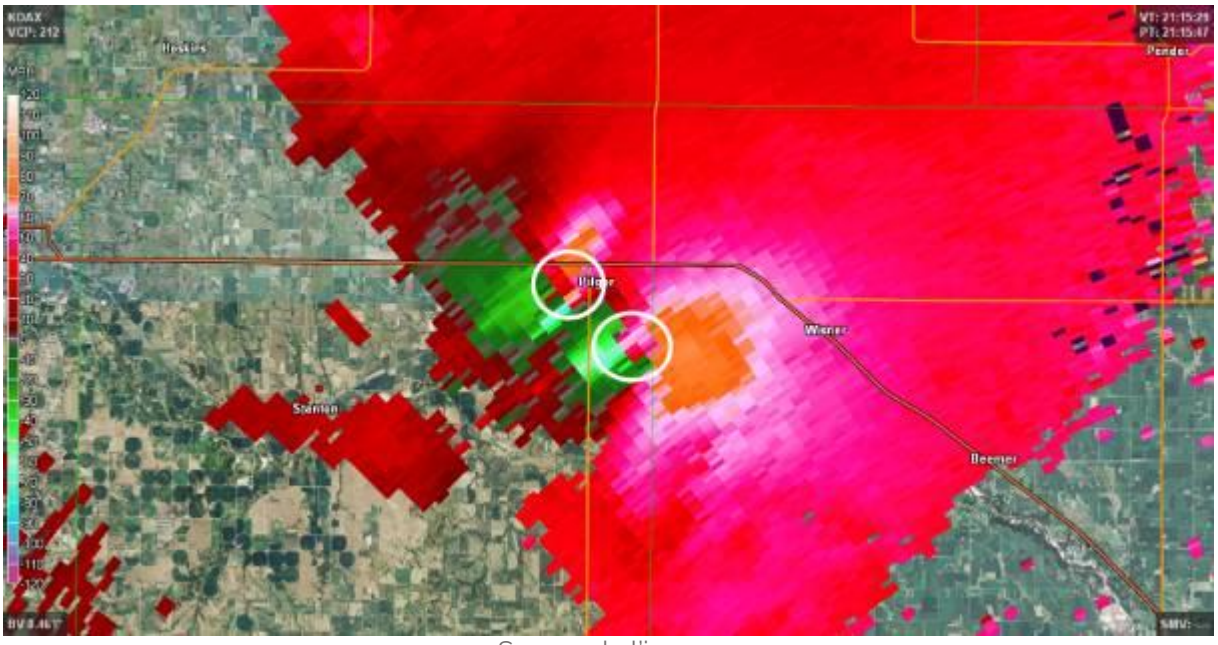
Cependant, à Simla, le fait que le flux d'altitude était orienté sud-ouest - nord-est et que la cellule se déplaçait plein sud amenait une organisation un peu particulière de la cellule orageuse. Le courant ascendant se situait en avant de la cellule orageuse dans le sens de déplacement.



Dans ce cas-ci, la position du mésocyclone lui permettait de profiter d'un surplus de vorticité. En effet, la zone de contact entre les deux courants descendants (avant et arrière), du courant ascendant et de l'inflow (flux entrant) à l'avant de la cellule (dans son sens de déplacement) présentait une source accrue de vorticité.

5. Les orages supercellulaires cycliques produisant plusieurs tornades

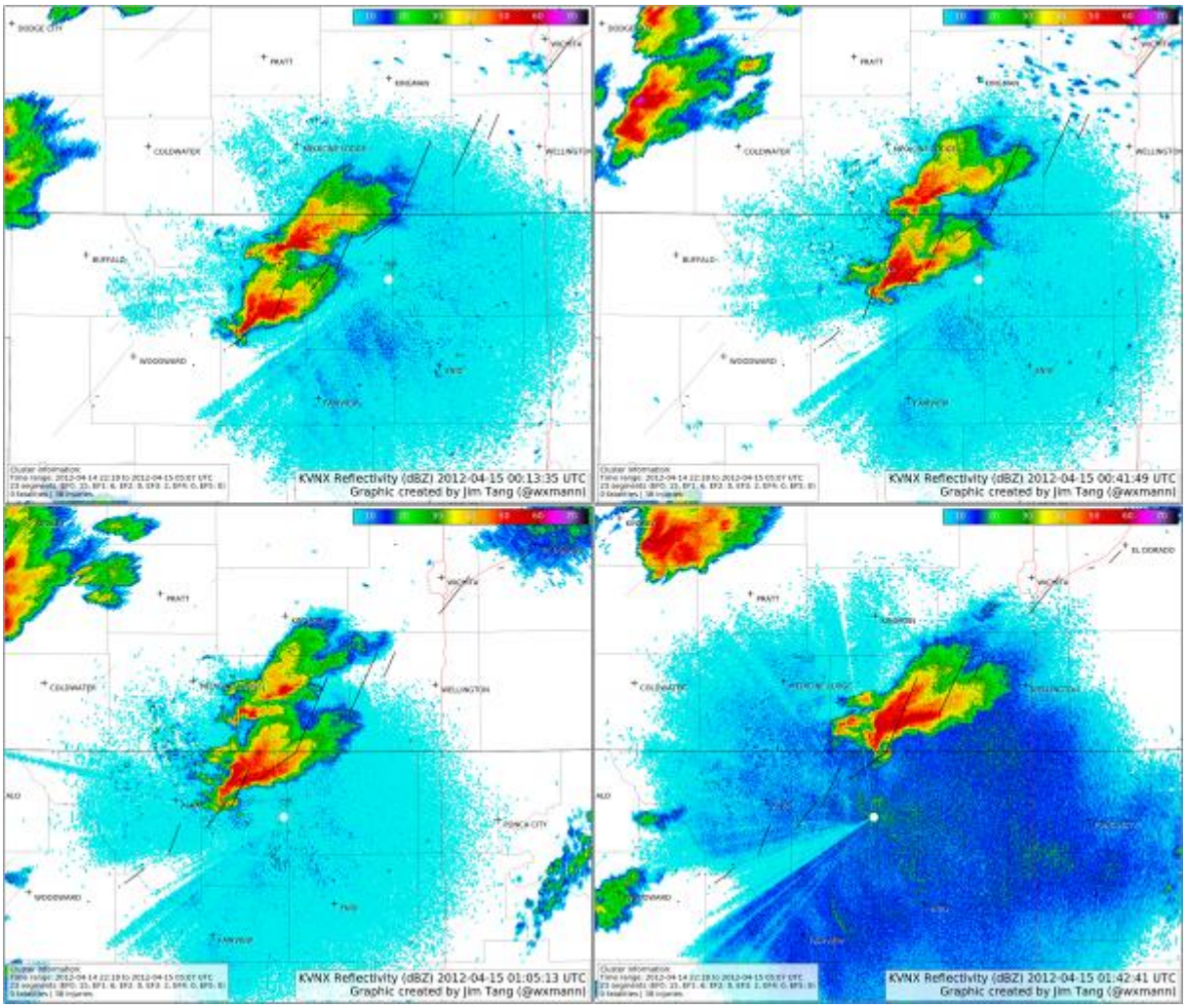
L'orage supercellulaire de Simla aura perduré environ quatre heures. Durant ce laps de temps, il aura connu des périodes de renforcements et de déclins temporaires. On nomme cela un orage cyclique. De tels orages peuvent parfois produire une flopée de puissantes tornades. Le meilleur exemple est l'orage supercellulaire qui produisit quatre tornades EF4 successives, dont deux simultanées dans la région de Pilger au Nebraska le 16 juin 2014. Cet orage comportait en fait deux zones de rotation cycloniques bien distinctes comme on peut le voir sur l'image radar de vélocité suivante :



Source de l'image :
http://thevane.gawker.com/how-did-the-rare-twin-tornadoes-in-nebraska-form-1592157507

Source de l'image : **http://www.silverliningtours.com/tag/2014/**

Le 14 avril 2012, de nombreuses supercellules engendrèrent 97 tornades en Oklahoma, au Kansas, en Iowa et au Dakota du Sud. Deux supercellules ont même fini par fusionner pour produire à elles seules un total de 23 tornades dont deux d'intensité EF3.



Source de l'image :
https://www.ustornadoes.com/2018/04/14/a-comprehensive-radar-examination-of-the-april-14-2012-tornado-outbreak/

Source de l'image :
https://www.ustornadoes.com/2018/04/14/a-comprehensive-radar-examination-of-the-april-14-2012-tornado-outbreak/

Source de l'image : **Pecos Hank**

6. Les tornades à rotation anticyclonique

Dans l'hémisphère nord, les mésocyclones associés aux orages supercellulaires ont tendance à adopter une rotation cyclonique, c'est-à-dire qu'ils « tournent » dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Cependant, cette rotation n'est pas en lien direct avec la force de Coriolis.

La rotation que prend le mésocyclone dépend avant tout des cisaillements des vents verticaux, c'est-à-dire de l'évolution du flux en fonction de l'altitude. En règle générale, celui-ci varie à nos latitudes du secteur sud à sud-est dans les très basses couches au secteur sud-ouest à ouest en altitude. Le flux directeur étant de secteur sud-ouest ce qui amène un déplacement habituel de l'orage vers le nord-est.

Lorsqu'une séparation de cellules a lieu (splitting storm), on assiste au déplacement de deux cellules distinctes. L'une se déplaçant vers la droite par rapport au flux moyen (cellule moteur droit), l'autre vers la gauche (cellule moteur gauche).

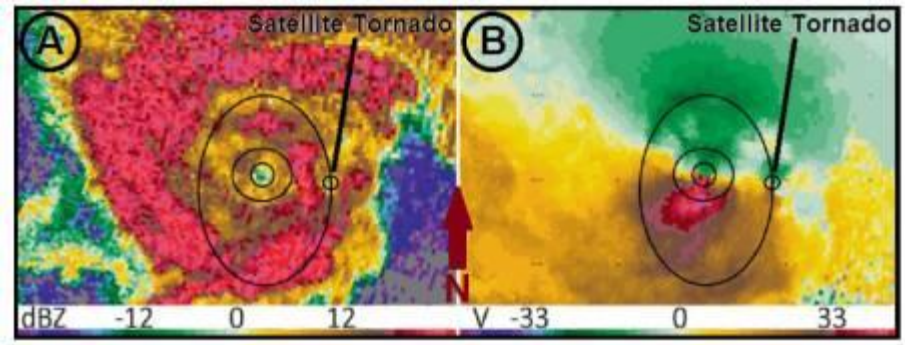
Dans la plupart des cas donc, le cisaillement des vents vertical sera favorable au renforcement de la cellule se déplaçant vers la droite par rapport au flux moyen. Ainsi, cette cellule perdure plus longtemps car elle profite d'une meilleure hélicité. Mais ce n'est pas toujours le cas. La cellule « moteur gauche » peut aussi s'intensifier, pour peu que le cisaillement vertical le favorise.

Si la rotation du mésocyclone est cyclonique, la tornade issue de celui-ci adoptera logiquement une rotation cyclonique. Ainsi, les cellules « moteur droit » auront tendance à développer des tornades cycloniques et les cellules « moteur gauche » auront (plus rarement il est vrai) la capacité de former des tornades anticycloniques.

Certaines tornades anticycloniques peuvent aussi apparaitre en compagnie de tornades cycloniques plus fortes, et ce sous la base d'un mésocyclone à rotation cyclonique. Ces tornades sont nommées tornades satellites. On précise que les mésocyclones à rotation anticyclonique s'appellent des méso anticyclones.

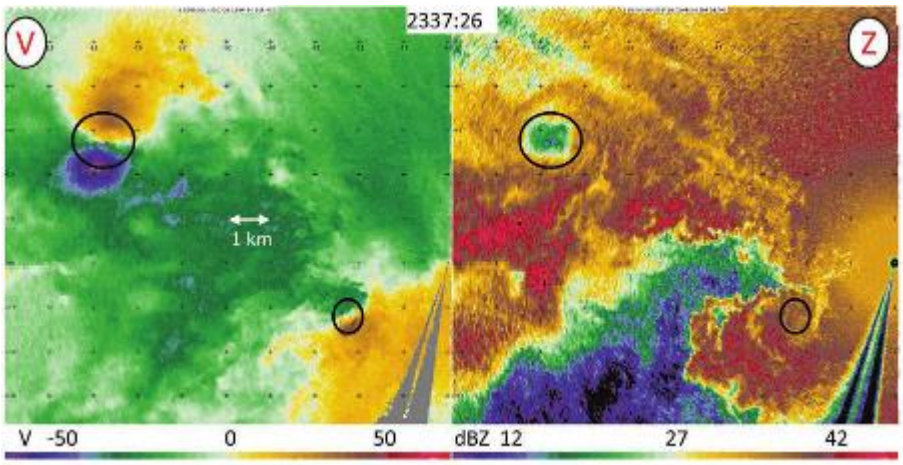
Photographie de deux tornades non mésocycloniques (landspouts) le 28 mai 2018 près de Cope au Colorado
Source de l'image : **https://www.weather.gov/bou/MemorialDay2018Tornadoes**

Les tornades satellites à rotation anticyclonique ne sont pas si rares que cela. L'exemple ci-dessous date du 3 mai 1999 près de Chickasha. Alors qu'une puissante tornade à rotation cyclonique faisait des ravages, une tornade anticyclonique l'accompagnait à distance.



Source de l'image : **Wurman and Koshiba**

Un autre cas, plus récent, date du 31 mai 2013 dans la région d'El Reno. Une puissante et large tornade était accompagnée d'une tornade satellite à rotation anticyclonique. Celle-ci était également intense. Sur les imageries radars ci-dessous, on constate bien la présence de deux zones de rotation, l'une cyclonique (en haut à gauche) et l'autre anticyclonique (en bas à droite).



Source de l'image :
https://www.researchgate.net/publication/262997349_The_Role_of_Multiple-Vortex_Tornado_Structure_in_Causing_Storm_Researcher_Fatalities

Dans le cas de la supercellule de Simla, la tornade principale à rotation cyclonique n'était pas très intense, ni très large. Il est même apparu que la tornade anticyclonique qui sévissait au même moment présentait sur les imageries radars une intensité plus élevée. Peut-on donc parler d'une tornade satellite dans un tel cas ?

En fait, pour être précis, il faut se rappeler que deux tornades à rotation anticyclonique ont été observées. La première se développa au moment où une tornade plus large sévissait.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

La seconde, celle qui nous intéresse le plus, se développait également en compagnie d'une tornade plus large. Cependant, la tornade anticyclonique perdura encore dans le temps alors que la tornade « principale » se déstructurait.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

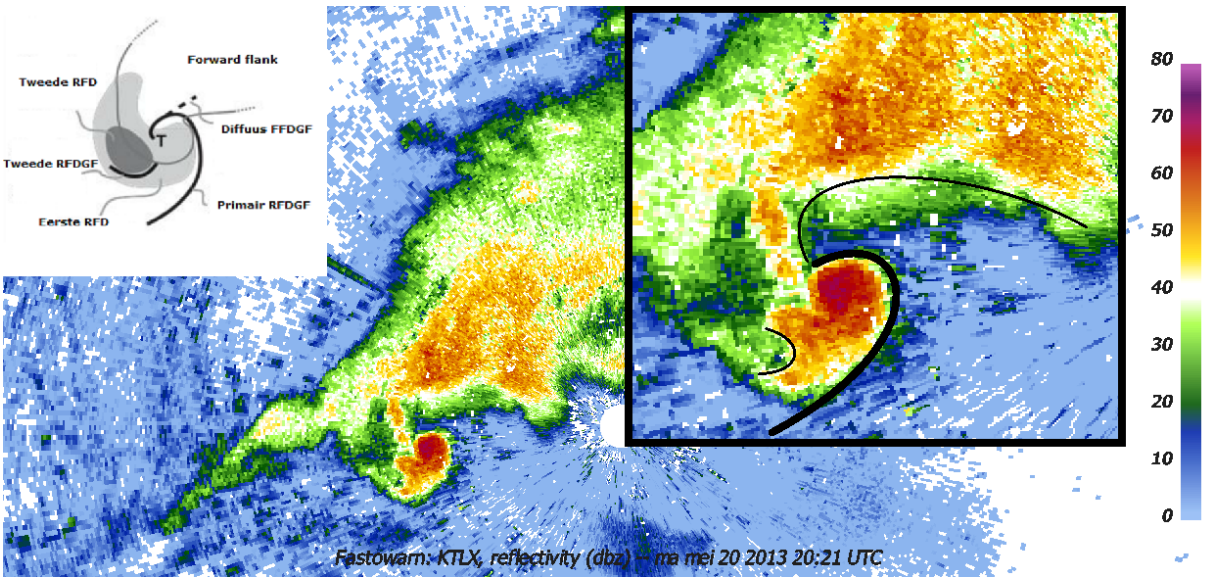
7. Deux zones de rotation (cyclonique et anticyclonique) sous la base du même mésocyclone

Dans le cas de l'orage de Simla, les observations mettent bien en évidence deux zones de rotation marquées. Chacune produisant des tornades (cycloniques et anticycloniques). Il est compliqué de savoir ce qui a pu amener deux zones de rotation sous la base du même mésocyclone.

Une théorie émanant des recherches menées sur la tornade du 31 mai 2013 à El Reno nous apprend que la survenue d'un courant arrière nommé « inflow jet » situé à l'arrière de la zone de rotation principale pourrait amener une percée au sein de celle-ci. Ainsi, deux zones de rotation différentes peuvent se développer sous la base du même mésocyclone, et ce de chaque côté de cette percée du jet.

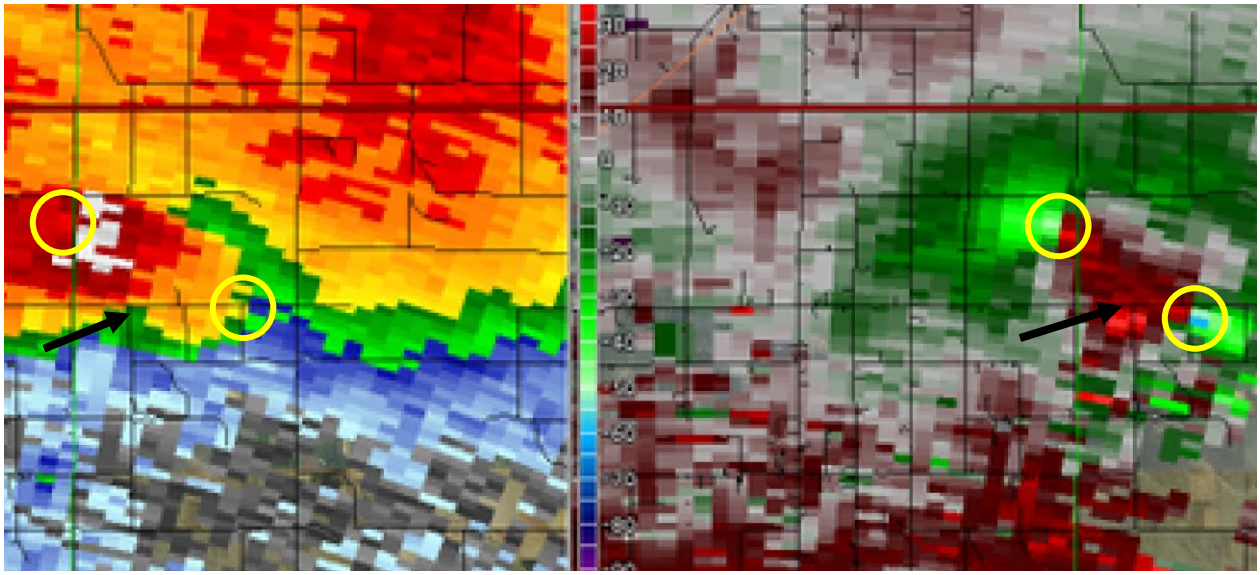
Dans le cas d'El Reno, cet inflow jet serait dû en partie à la survenue d'une seconde supercellule à l'arrière de la première. Dans le cas de Simla par contre, aucune autre supercellule n'était proche.

Pour tenter de comprendre, prenons un autre exemple, celui du 20 mai 2013 à Moore. Le schéma ci-dessous reprend la réflectivité au moment où une puissante tornade dévastait la région. Nous avons vu plus haut qu'un jet arrière pouvait s'introduire à l'arrière des précipitations issues du RFD. Si on reprend l'imagerie de la supercellule de Moore, on retrouve pareille intrusion. Mais ici, il ne s'agit aucunement d'un courant issu d'une autre supercellule mais bien de ce que l'on nomme un « surge» issu du RFD. C'est-à-dire une sorte d'impulsion au sein même du RFD. La dénomination exacte de cette impulsion est le RFDIS.



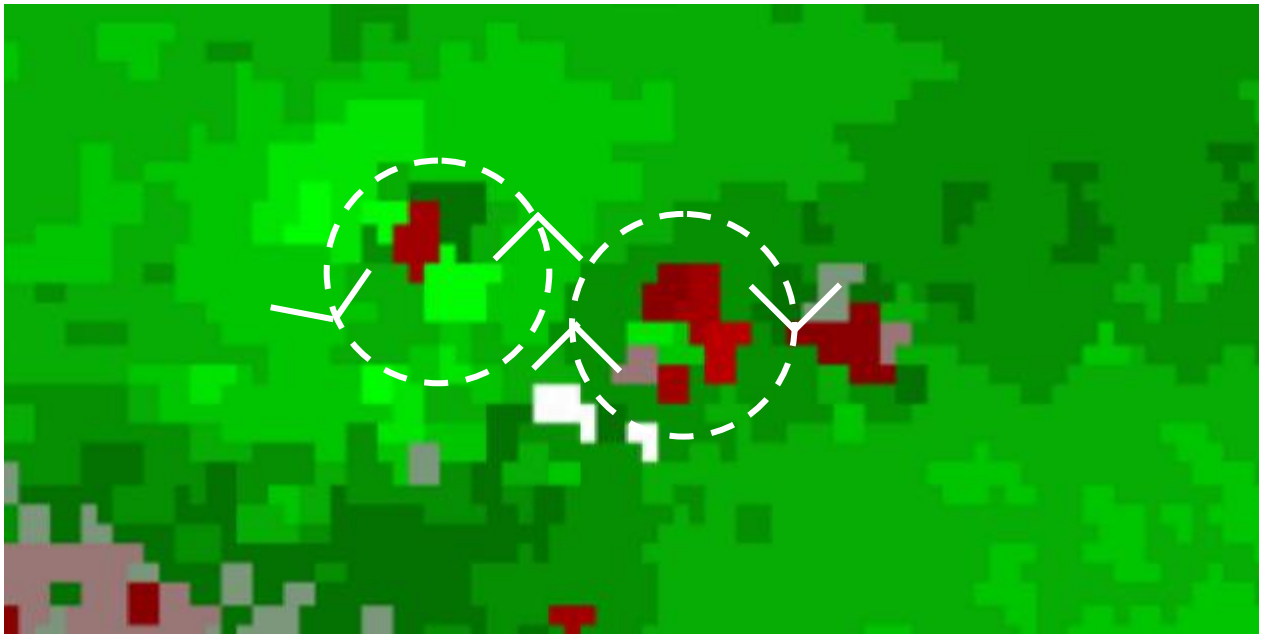
Source de l'image : **Fastowarn**

En reprenant une image de la supercellule de Simla, on retrouve pareille encoche. Sur l'image de gauche de réflectivité, on constate une zone de faible réflectivité. Elle semble s'introduire dans la zone de forte réflectivité qui matérialise un puissant RFD. L'image de vélocité de droite montre deux zones de rotation distinctes (cyclonique et anticyclonique) de chaque côté de cette encoche. Ainsi, il est possible que la survenue d'un RFDIS ait pu avoir une influence non négligeable sur la survenue des deux zones de rotation sous le même mésocyclone.



Source des images : **https://twitter.com/search?q=%23cowx&src=hash**

L'image ci-dessous reprend les données de la « storm relative velocity » au même moment.



Source de l'image : **IEM**

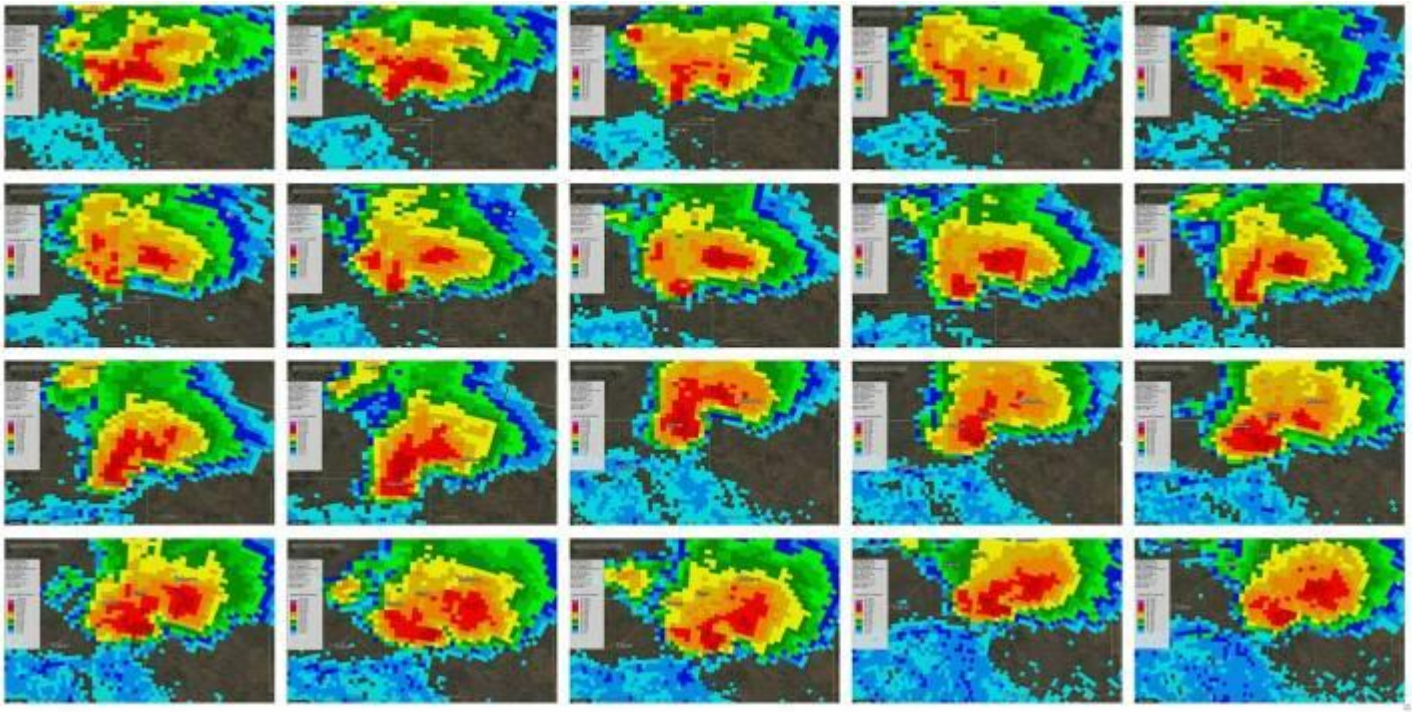
Les analyses des images radars de vélocité nous ont permis de constater que deux zones de rotation se sont mises en place progressivement entre 23h30 et 24h00 UTC. L'une classiquement cyclonique et l'autre anticyclonique. Sur les photographies suivantes, on visualise très bien la situation.

Source des images :
https://www.youtube.com/watch?time_continue=2802&v=MKVKBn4Mgjw&feature=emb_logo

8. Images radars

8.1. Images radars de réflectivité

Nous avons réalisé un assemblage des images radars Doppler de réflectivité issues du radar de Pueblo entre 22h52 et 00h30 UTC.



Source des images : **NOAA**

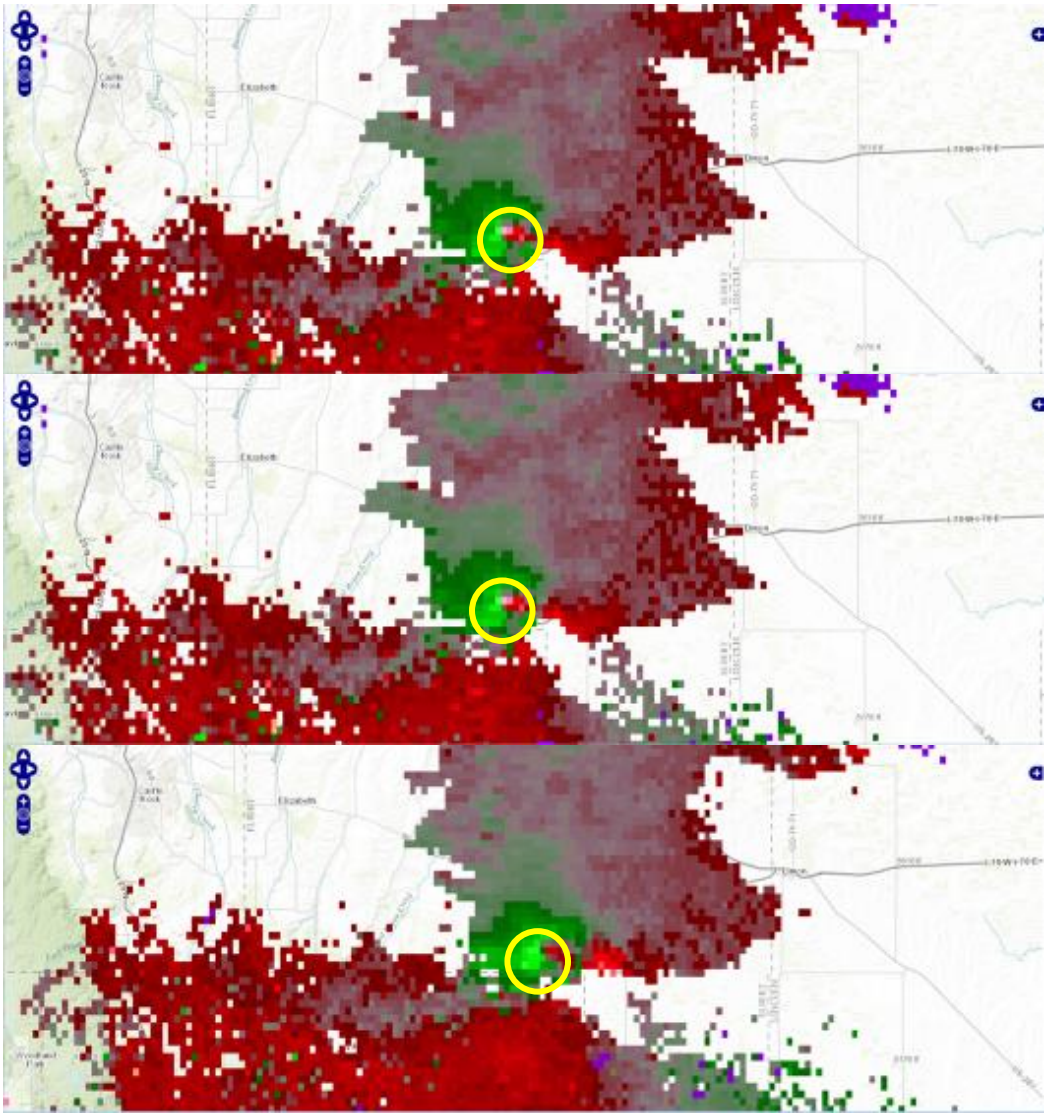
.

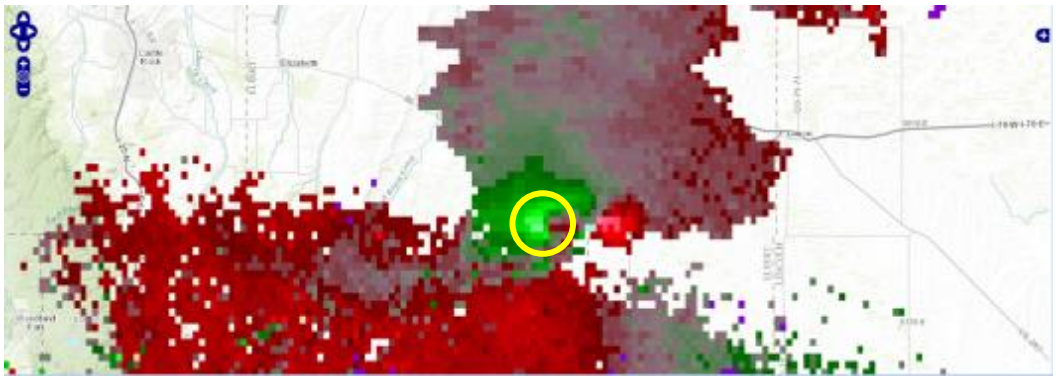
Ces images montrent l'évolution de la cellule durant toute la période où elle produit les huit tornades. On constate que cet orage passe par différents stades d'évolution durant son périple.

Pour les analyses radars, nous allons utiliser les images Doppler issues du radar NEXRAD situé à Pueblo. Le radar de Pueblo se situe à une distance approximative de 50 km à 60 km de la zone de rotation de l'orage supercellulaire au moment où celui-ci produit les tornades. Sa position au sud-sud-ouest de la supercellule est un avantage non négligeable. En effet, l'absence de précipitations entre le radar et la zone d'alimentation de l'orage (autrement dit la base du courant ascendant) permet aux impulsions émises par l'antenne de ne pas être perturbées par un quelconque obstacle.

8.2. Images radars de vélocité

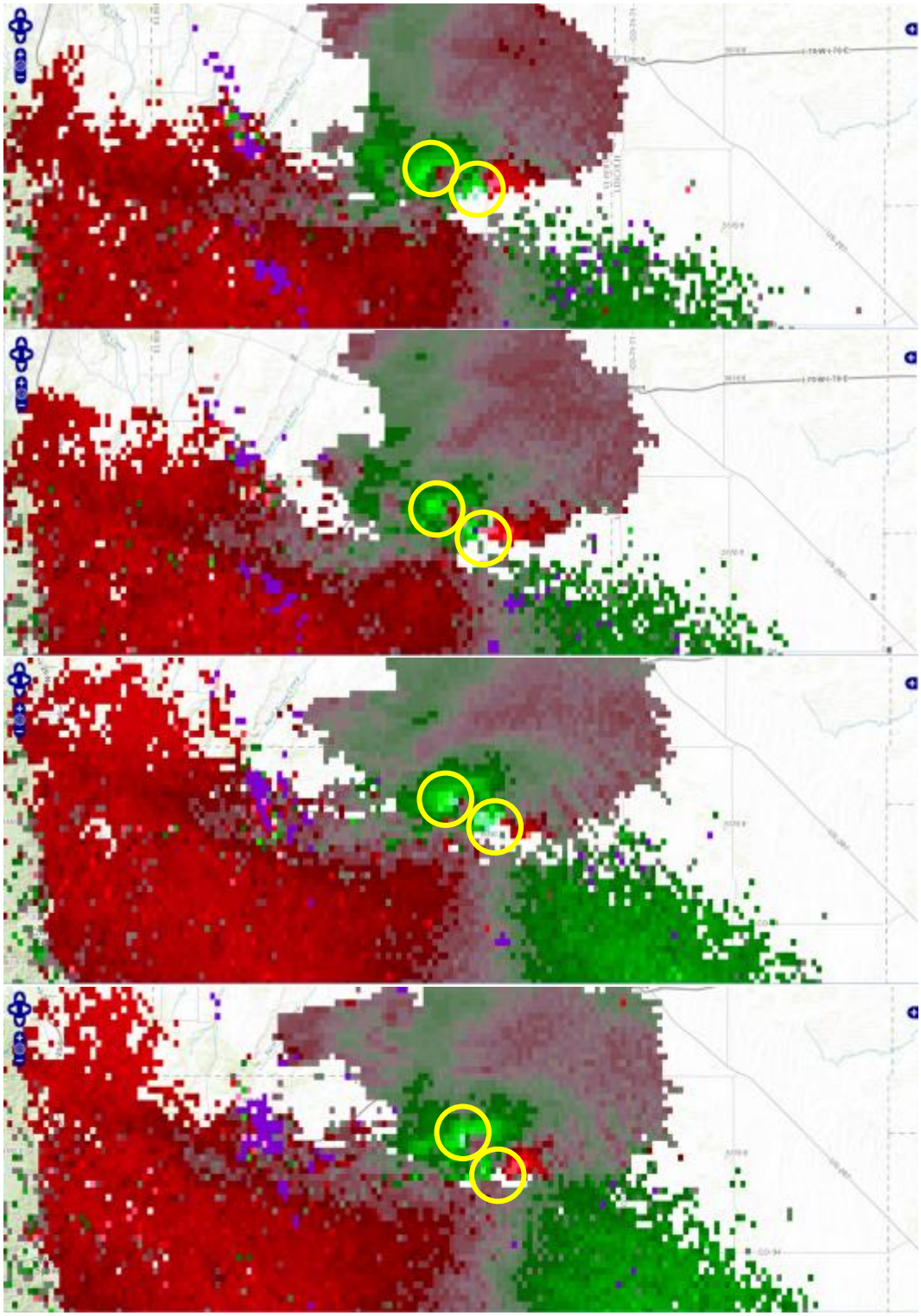
Prenons à présent les images de vélocité pour mieux visualiser les zones de rotations. Entre 23h30 et 24h00 UTC, une seule zone de rotation très large est bien visible sur les imageries radars. Durant cette période donc, trois tornades vont sévir, toutes à rotations cycloniques.





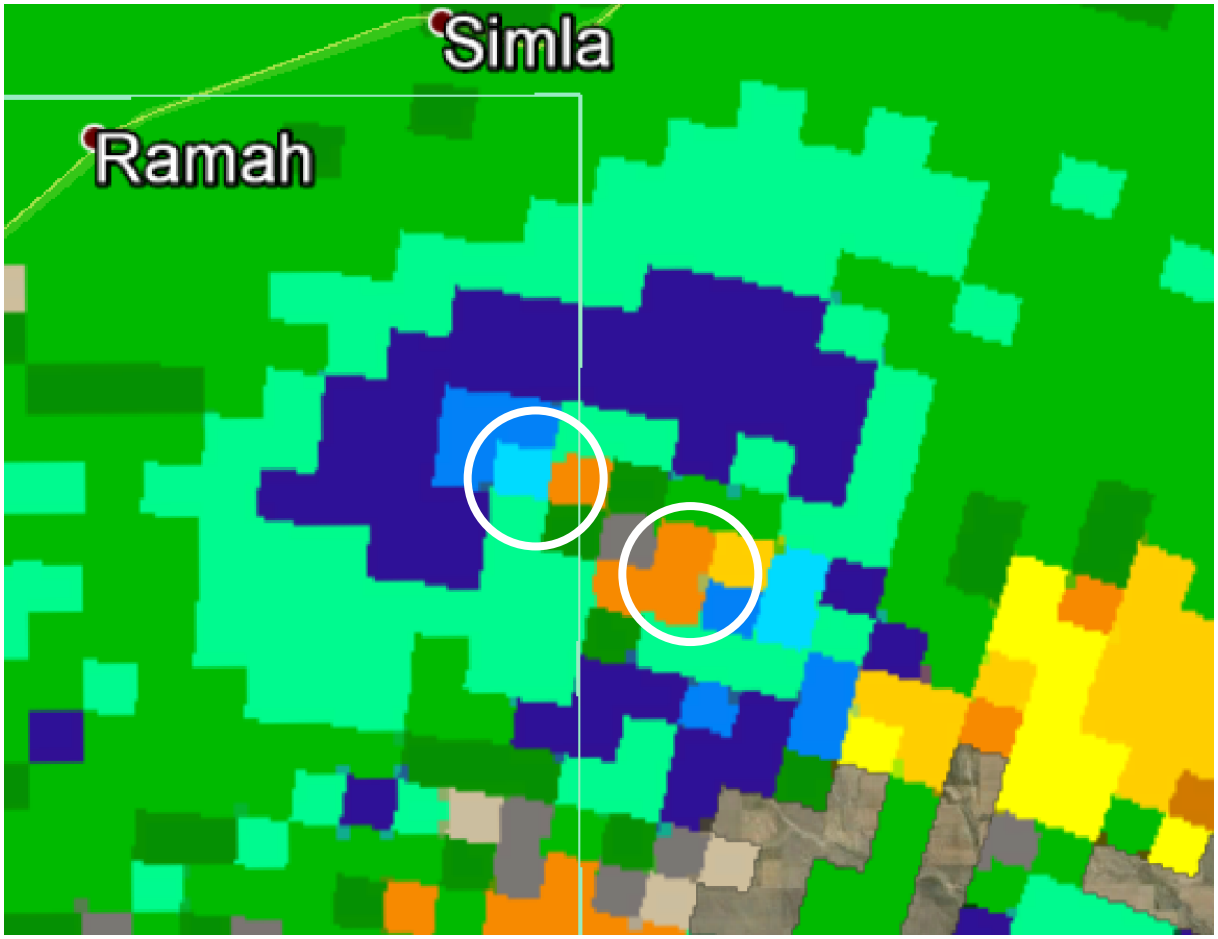
Source des images : **IEM**

Entre 00h00 et 00h30 UTC, on constate l'apparition d'une seconde zone de rotation à l'est de la première. La zone de rotation principale devient progressivement de moins en moins marquée.



Source des images : **IEM**

L'image radar suivante prise à 00h14 UTC montre parfaitement deux zones de rotation, l'une cyclonique et l'autre anticyclonique.



Source de l'image : **IEM**

8.3. Diagramme des champs des vents à différentes altitudes

Les archives radars de Pueblo proposent des données de la direction et de la vitesse du vent, et ce à une altitude entre 6000 et 14000 pieds, à savoir donc à une altitude oscillant entre 1820 et 4200 mètres environ. À une plus haute altitude, les données sont incomplètes ce qui nous empêchent de les utiliser.

Si on extrapole les données par rapport à l'altitude où se trouve le radar, l'altitude 6000 pieds concerne donc les très basses couches (environ 200 mètres) tandis que l'altitude 14000 pieds concerne les couches moyennes, c'est-à-dire à environ 2400 mètres au-dessus du radar.

Ces différentes altitudes sont très intéressantes car elles nous permettent de mieux visualiser le comportement du vent à des hauteurs qui, si on pouvait les transposer à la taille d'une supercellule « commune », correspondraient généralement sous la base du courant ascendant (pour le point le plus bas) à la zone où se situe généralement le mésocyclone (pour le point le plus haut).

D'emblée, sur les diagrammes de la page suivante, nous pouvons constater la présence d'un important changement de direction du vent avec l'altitude, entre 1820 et 4200 mètres donc. En effet, le flux bascule du secteur est à sud-est au secteur sud à sud-ouest.

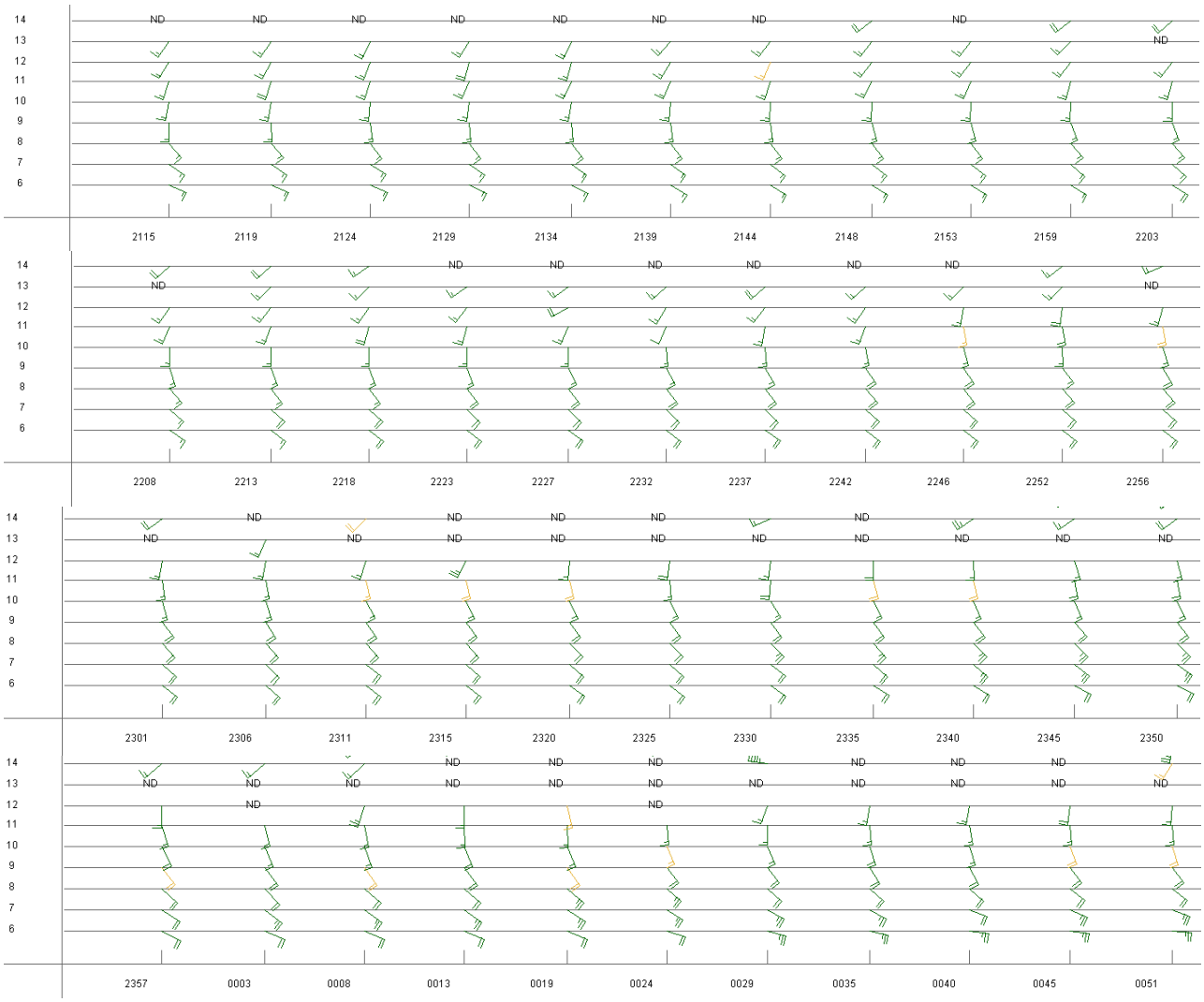
Mais les données à plus haute altitude, bien qu'incomplètes, confirment que ce changement de direction se poursuit pour passer du secteur sud-ouest au secteur ouest-sud-ouest.

Une telle situation indique donc un important cisaillement des vents directionnels à une hauteur oscillant entre 200 et 2400 mètres. Mais les analyses fines nous indiquent aussi un renforcement des vents au fil des heures, principalement dans les basses couches. Ce renforcement semble atteindre son paroxysme aux environs de 00h30 UTC.

Un autre élément semble se démarquer sur les diagrammes, c'est le peu d'influence (apparente) de la supercellule vis-à-vis de la direction du vent à l'endroit où se situe le radar. Mais n'oublions pas que l'orage passe au nord puis au nord-est du radar ce qui signifie que ce dernier se situe toujours au sud et au sud-est de la colonne d'alimentation qui, à son point le plus proche aux environs de 01h00 UTC est encore à environ 50 km du radar Doppler.

Ceci explique sans doute le peu de changement dans la direction du vent observé avec le temps si ce n'est l'orientation progressive du flux des très basses couches au secteur est au fil des heures.

Voici les diagrammes produits par le radar de Pueblo entre 21h15 et 00h51 UTC.



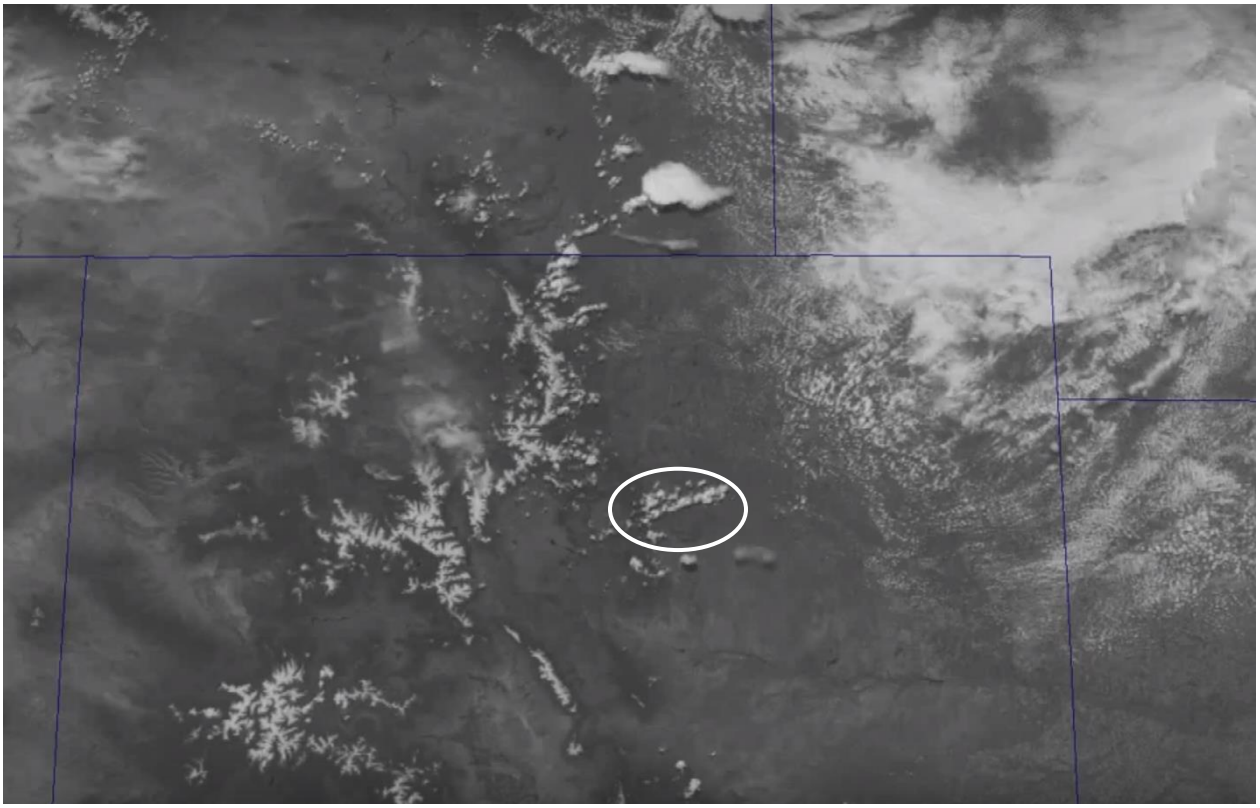
Source des images : **NOAA**

Source de l'image : **Kelly DeLay**

Source de l'image : **Ian Livingston**

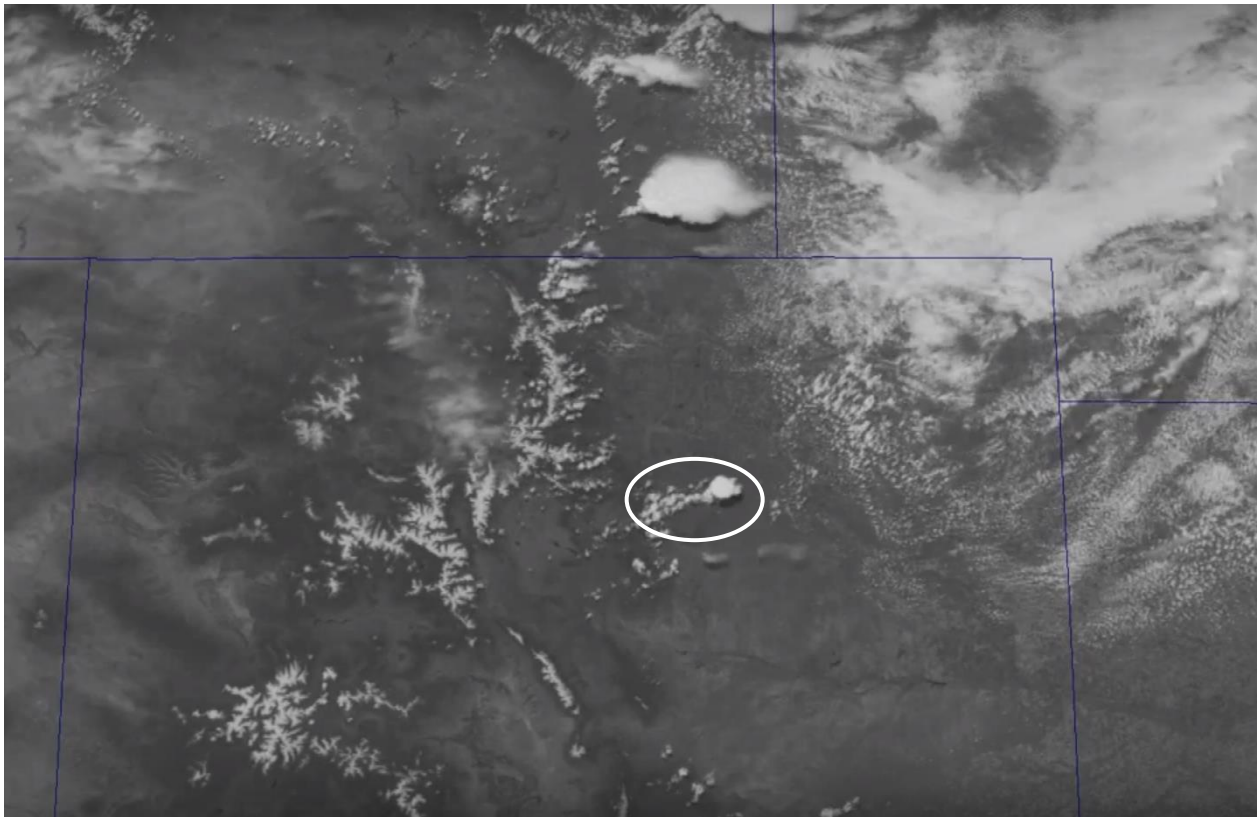
9. Déroulement de la situation, analyses satellites, radars et photographiques

Selon les images satellites, on peut constater le développement de toute une bande de nuages convectifs depuis le flanc nord du Pikes Peak jusqu'à l'est de la Palmer Divide, aux environs de 13h00 MDT. Au même moment, un orage déjà bien développé est visible sur le sud-est du Wyoming. Comme nous l'avons vu précédemment, la présence conjointe de la Palmer Divide et du Pikes Peak ont très certainement favorisé la survenue de ces nuages convectifs.



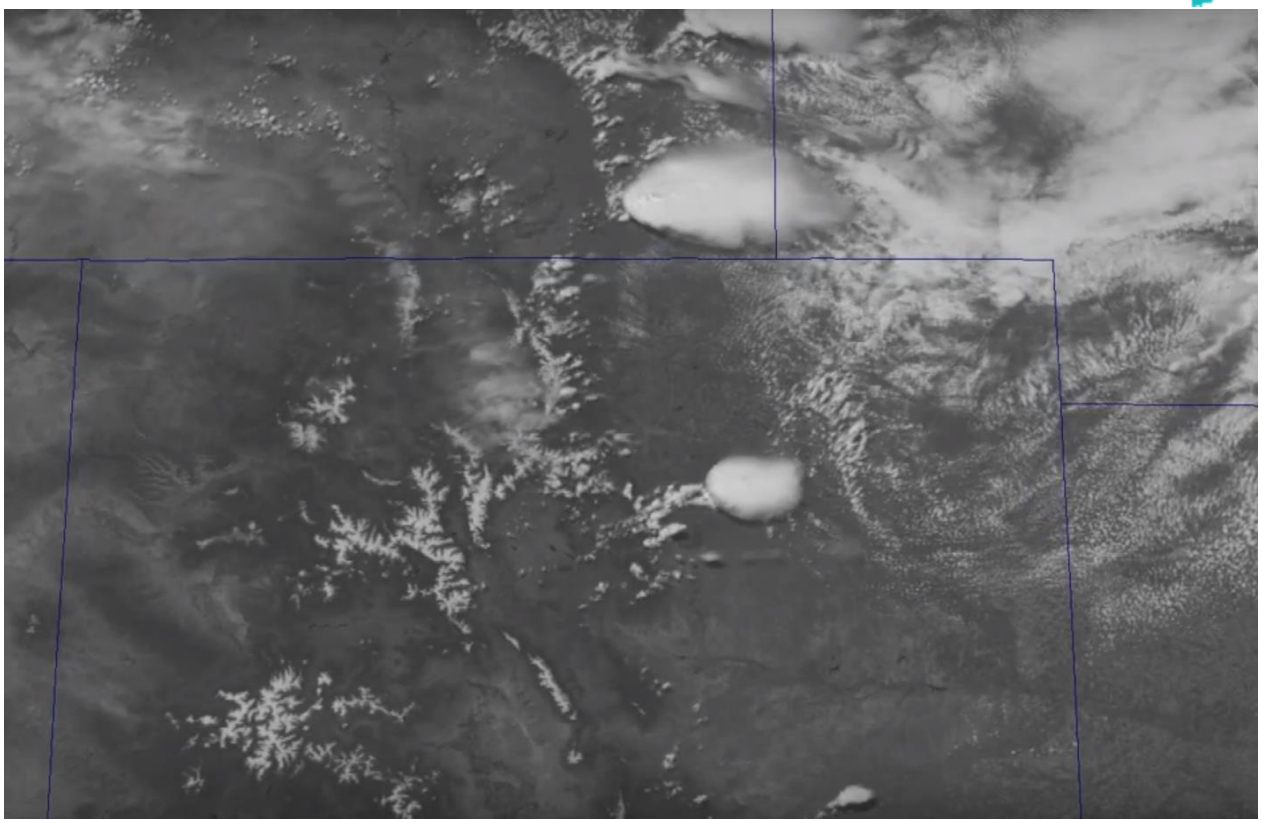
Source de l'image : **https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=yy4NOgsYdDc**

Vers 13h30 MDT, la situation a rapidement évolué. Une cellule convective se développe à l'extrémité est du paquet convectif, proche de Kiowa.



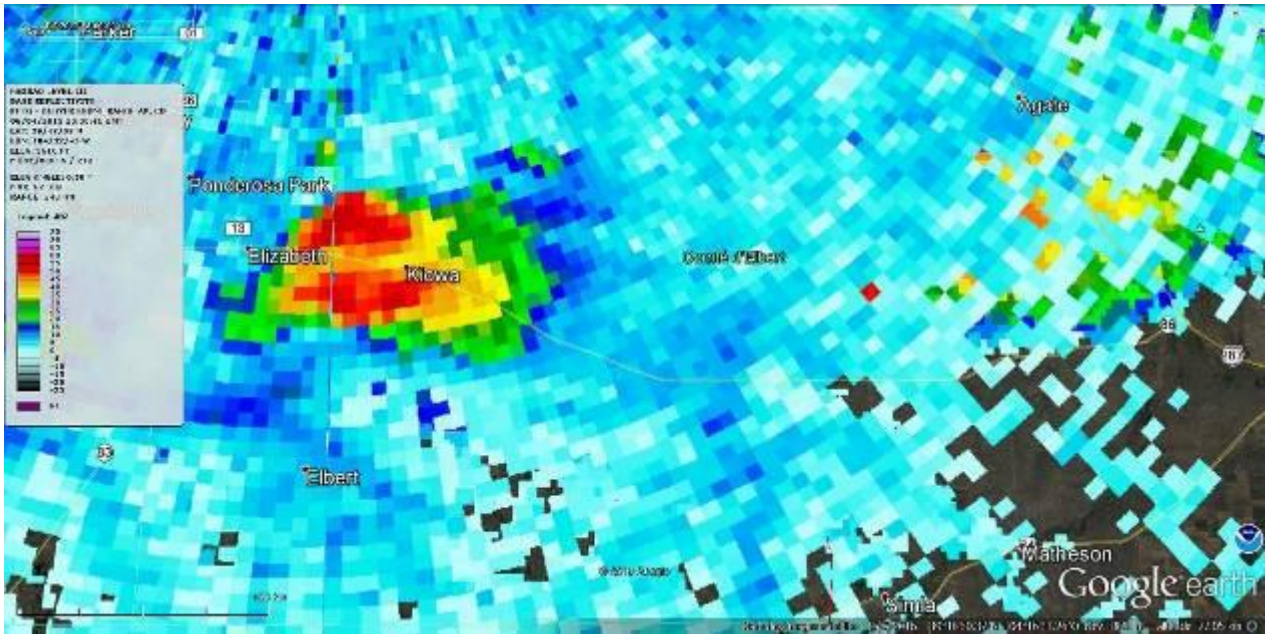
Source de l'image : **https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=yy4NOgsYdDc**

À 14h00 MDT, l'orage est déjà bien développé. Les premières précipitations sont observées à Elizabeth aux environs de 14h30 MDT tandis que Comanche Creek et Kiowa (environ 40 km au nord-ouest de Simla), sans recevoir de précipitations, subissent cependant l'outflow orageux avec des températures baissant de 26°C à 23°C en quelques minutes.



Source de l'image : **https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=yy4NOgsYdDc**

La première image radar nous montre la situation à 14h00 MDT. On constate bel et bien la présence d'une cellule orageuse du côté d'Elizabeth et de Kiowa.



La photographie ci-dessous montre l'orage au même moment, vu depuis l'est.

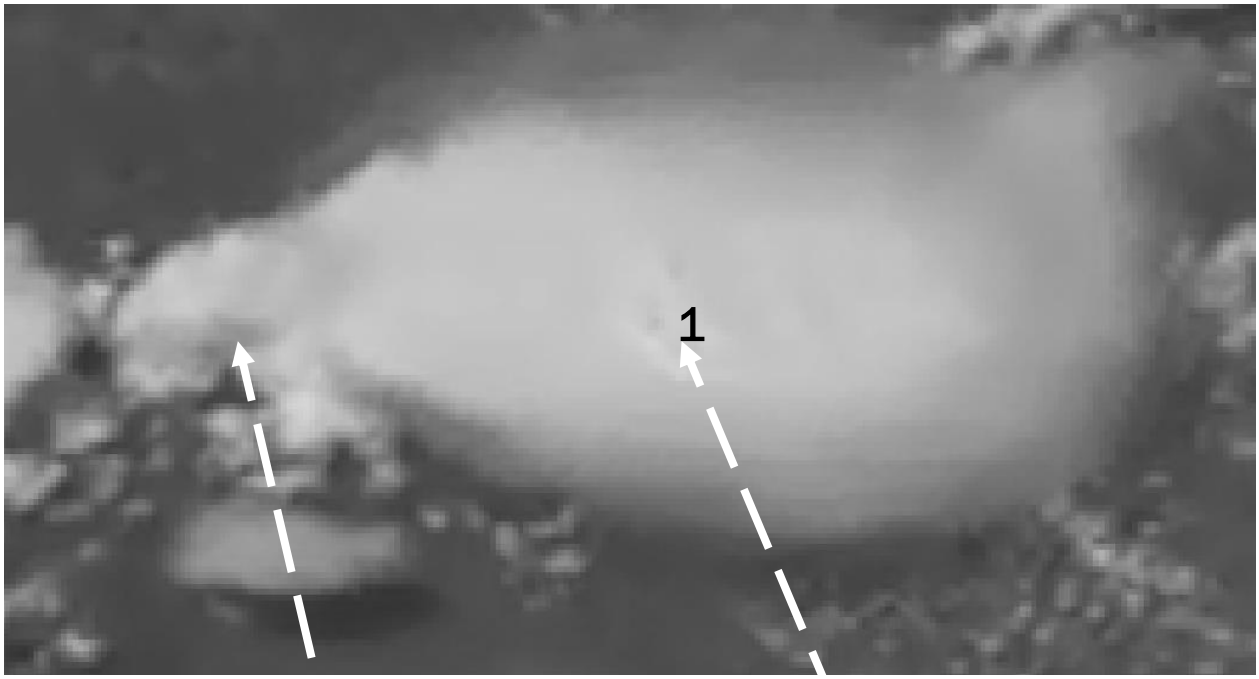
Source de l'image : **https://www.youtube.com/watch?v=JzVpgbvRLFY**

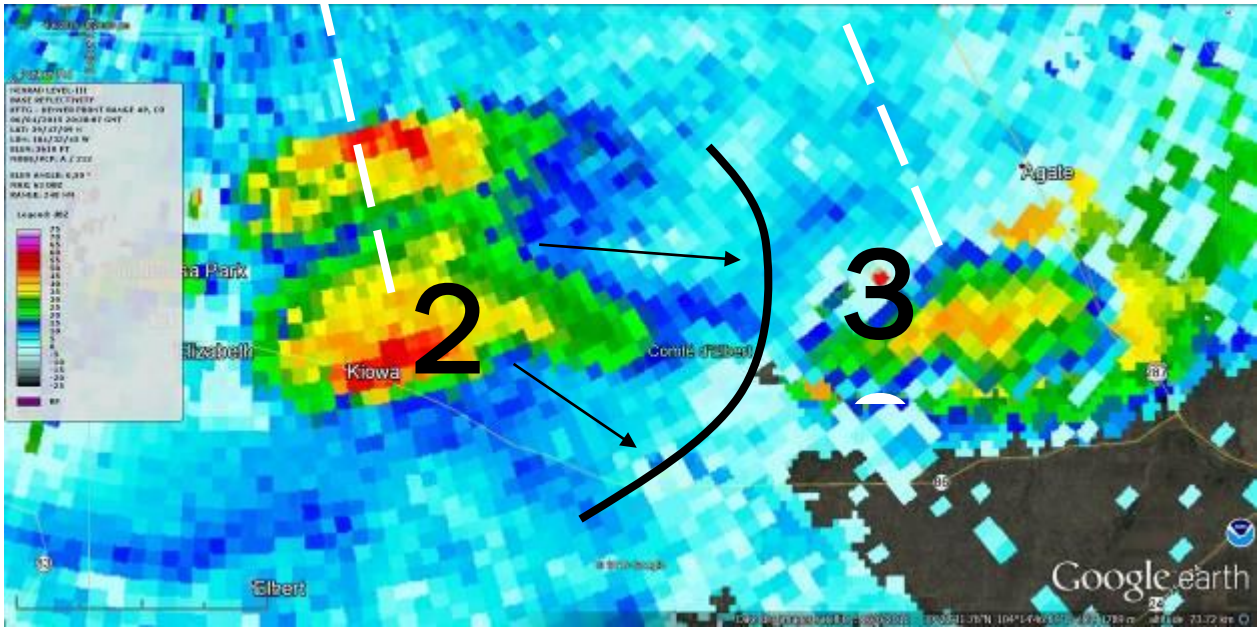
Grêlons observés dans la région d'Agathe au passage de la supercellule.

Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1021&overlay=false

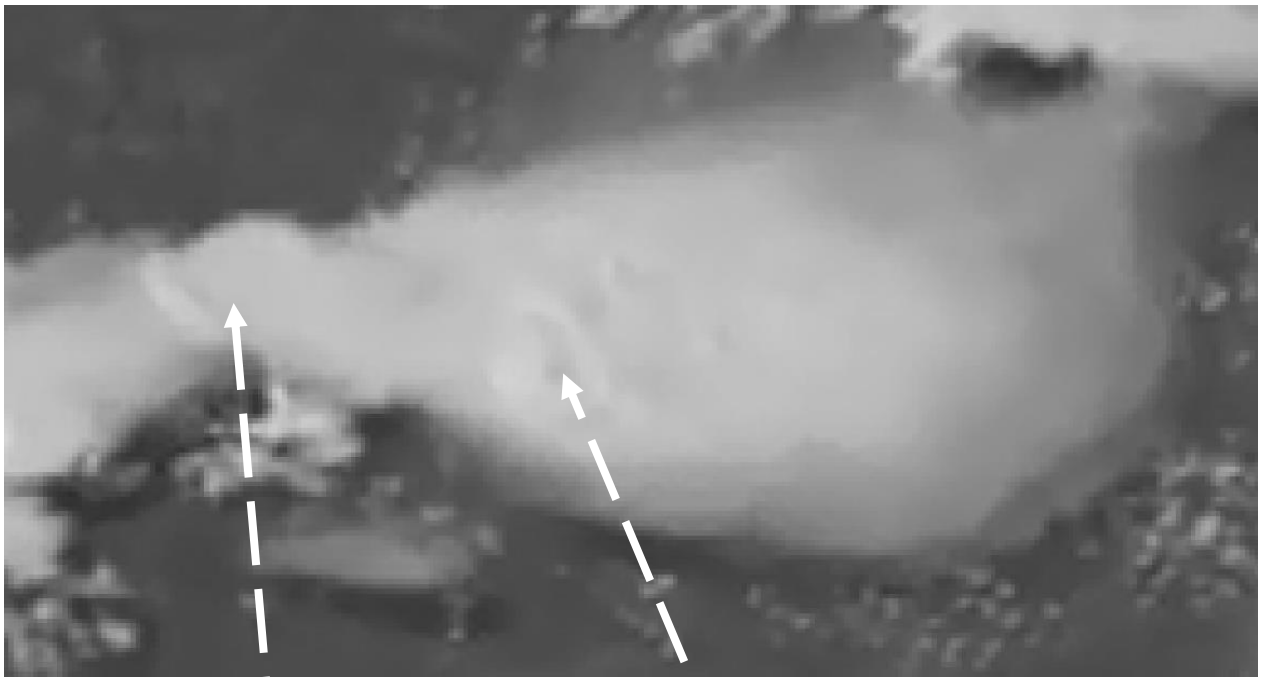
À 14h30 MDT, sur l'image satellite, nous constatons la présence d'un overshooting top (ou sommet pénétrant) au centre du panache nuageux (1). Cela signifie qu'un nouveau courant ascendant vigoureux se met en place à cet endroit là.

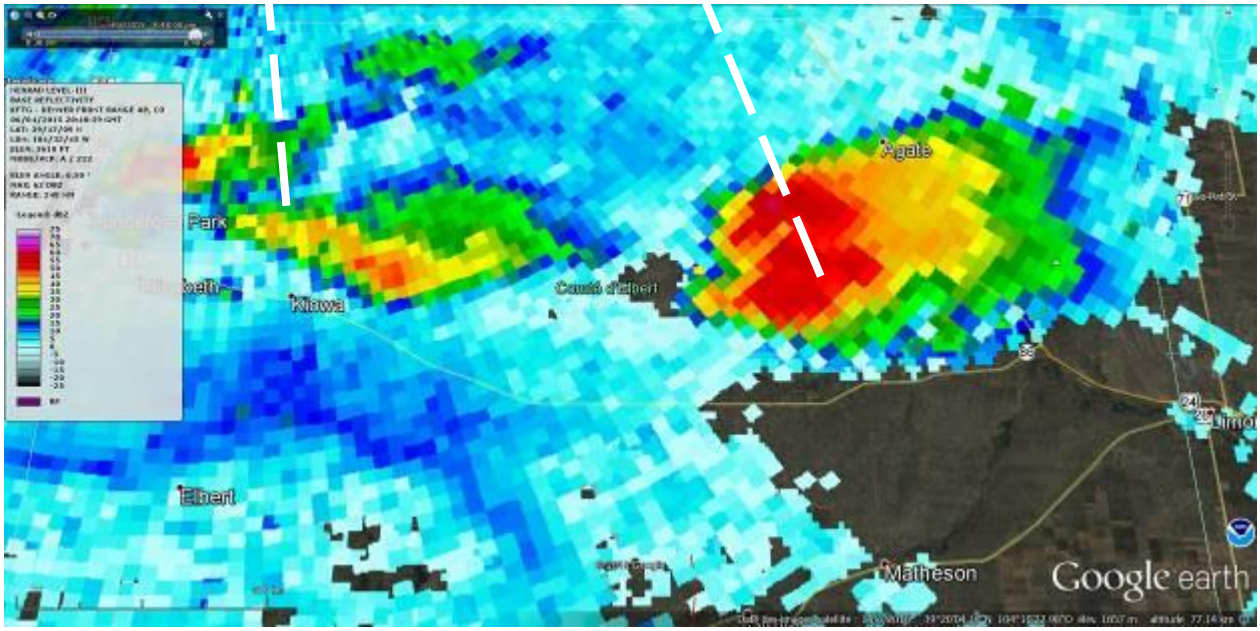
Il est fort probable que ce soit le courant descendant naissant dans les environs de Kiowa (2) qui apporte les forçages nécessaires au développement d'un nouveau courant ascendant dans la région d'Agate (3).





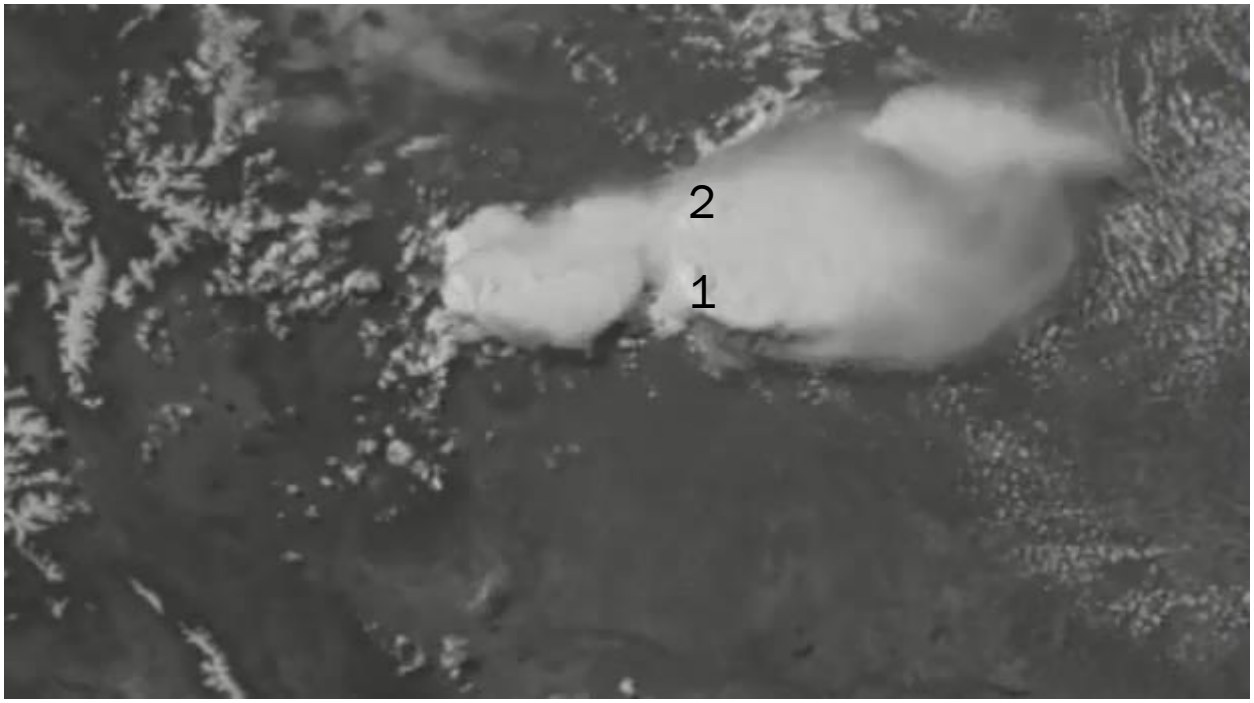
Quinze minutes plus tard, à 14h45 MDT donc, l'image satellite est plus parlante. On devine encore plus nettement des overshooting top au sein du panache nuageux, et donc la présence d'un puissant courant ascendant naissant dans la région d'Agate. Le courant ascendant initial situé dans la région de Kiowa perd cependant de sa vigueur. L'image radar du dessous confirme cela.

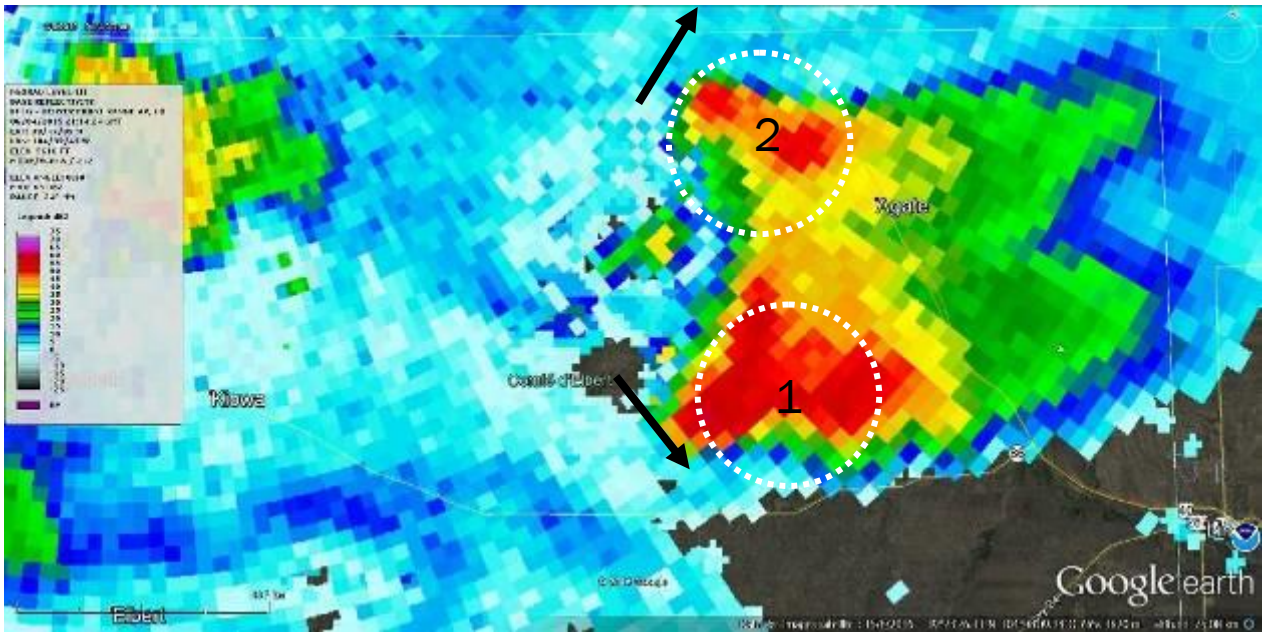




Á 14h40 MDT, la région d'Agate subit une chute de température spectaculaire, avec une baisse de 30˚C à 19˚C en une demi-heure ! À ce moment, une nouvelle cellule nait un peu plus à l'ouest, du côté de Castle Rock.

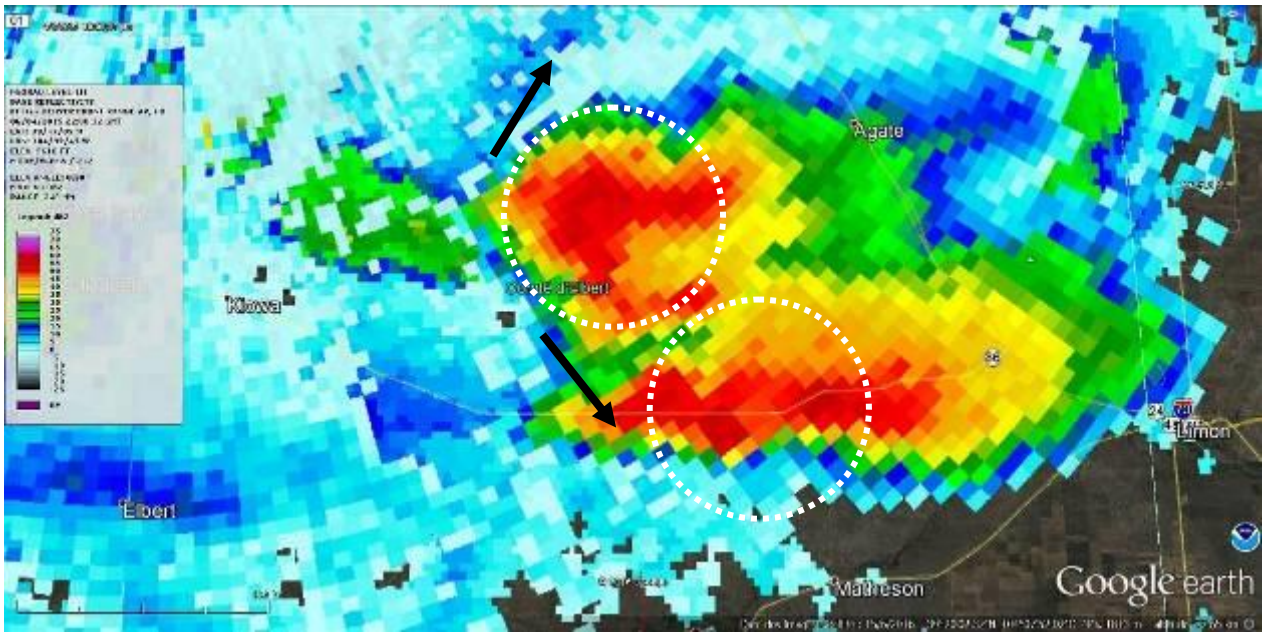
L'image satellite suivante à 15h15 MDT montre clairement deux puissants courants ascendants distincts. En fait, il s'agit d'une division de la cellule orageuse initiale (splitting storm). Le radar confirme cela.



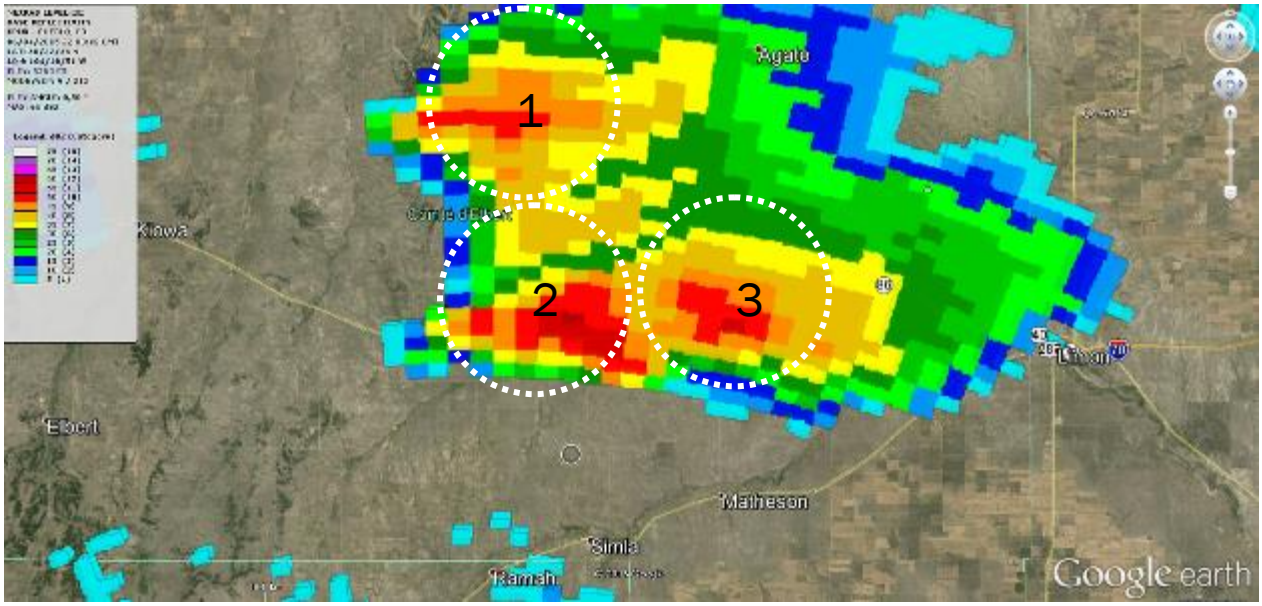


Comme souvent dans ce genre de cas, la cellule qui file vers la droite (le moteur droit) s'intensifie tandis que le « moteur gauche » s'essouffle assez rapidement. Cependant, n'oublions pas que la cellule « moteur droit » a tendance à se diriger plein sud. Cette remarque aura toute son importance dans l'évolution de l'orage qui va suivre.

Mais rapidement, un autre « splitting storm » se produit. En effet, entre 15h45 et 16h00 MDT, la cellule la plus occidentale prend à son tour la direction du nord-est tandis que l'autre cellule garde le cap vers le sud-sud-est.

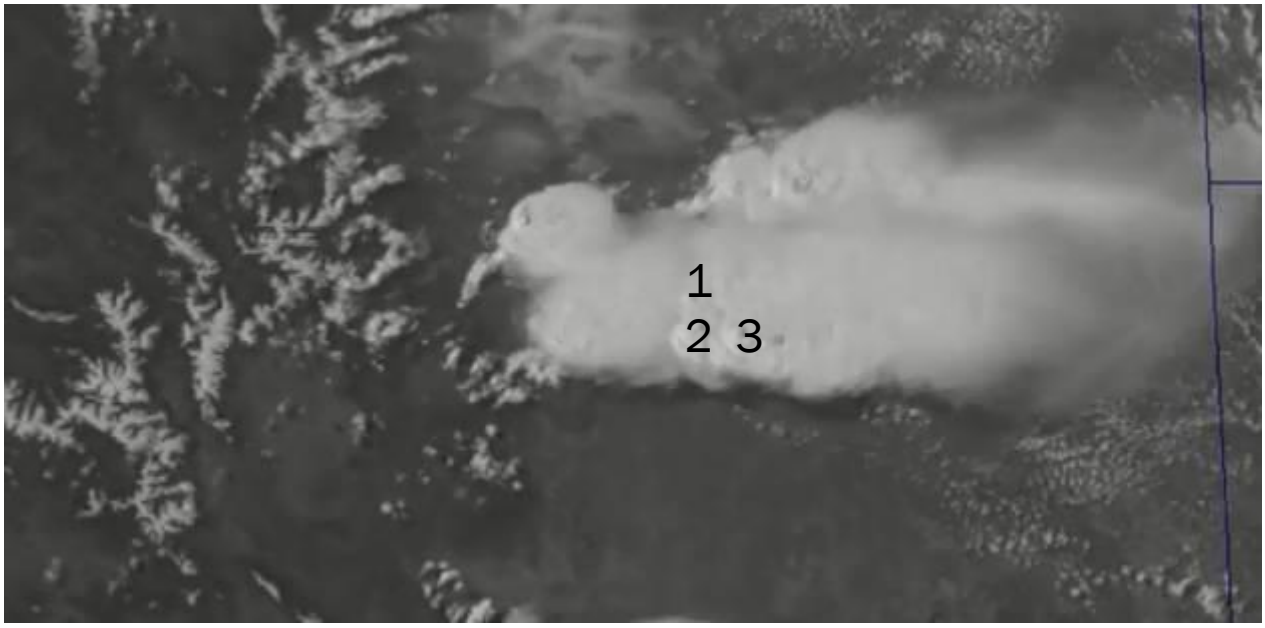


Aux environs de 16h00 MDT, un peu près une dizaine de minutes avant l'arrivée de l'équipe Belgorage dans la région de Matheson, la situation se présente comme telle.

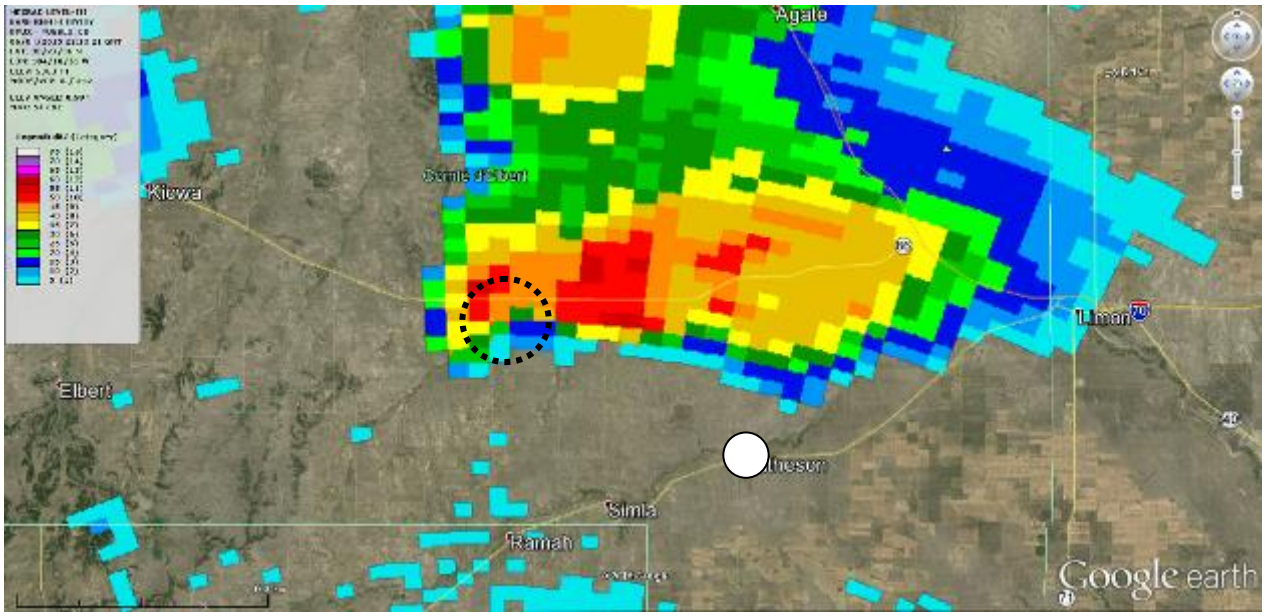


On peut constater la présence de trois noyaux de forte réflectivité assez distincts. Le premier dénotant la cellule moteur gauche qui semble ne plus progresser vers le nord-est, le second, la cellule moteur droit et enfin, un troisième noyau représentant le développement d'une nouvelle cellule.

Sur les images satellites, nous constatons le développement d'autres cellules plus au nord.



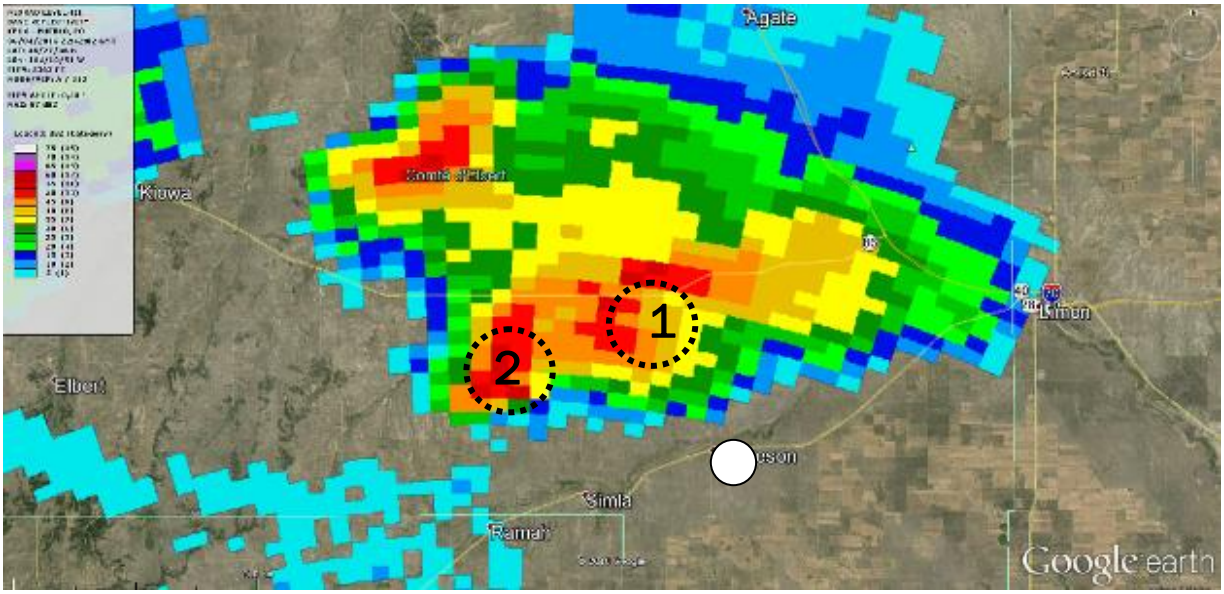
À 16h14 MDT, notre équipe de traqueurs d'orage arrive sur place (point blanc sur l'image radar). Le cercle noir indique la position théorique du mésocyclone visible par l'équipe. Le mot « visible » a toute son importance.



La photo ci-dessous a été prise à 16h26 MDT (22h26 UTC). Le mésocyclone est à ce moment-là déjà bien développé et on constate que la colonne d'alimentation est fortement inclinée.

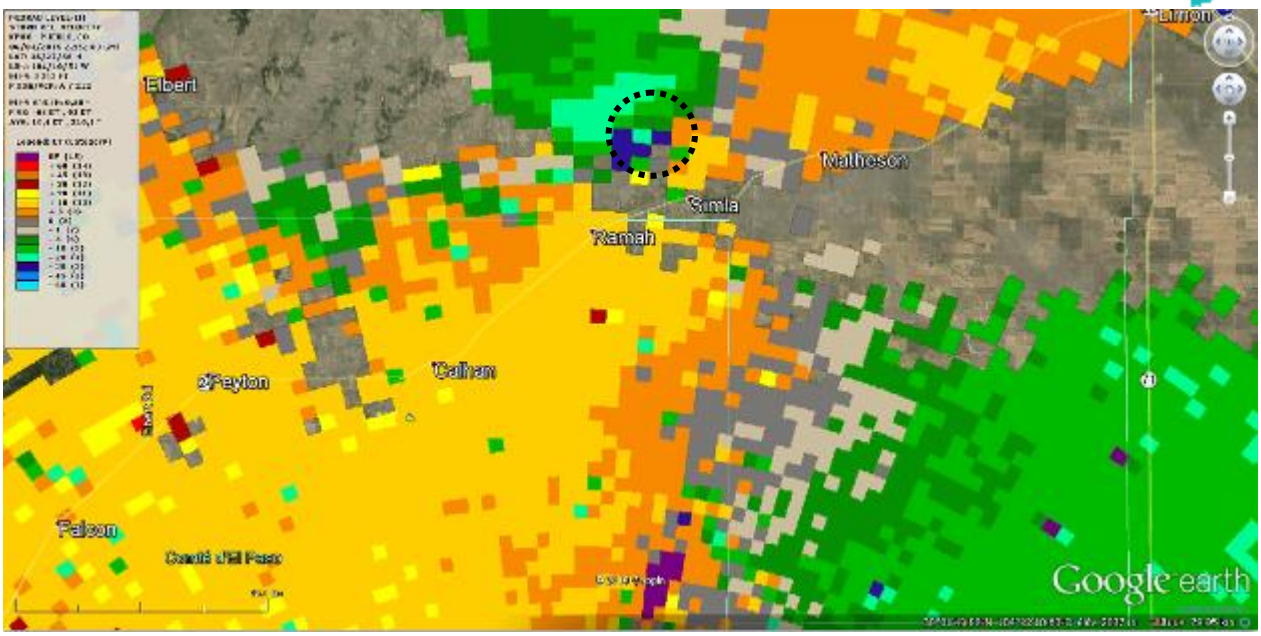
Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Celui-ci se déstructure cependant aux environs de 16h40 MDT tandis qu'un autre, plus vigoureux surgit à l'arrière.

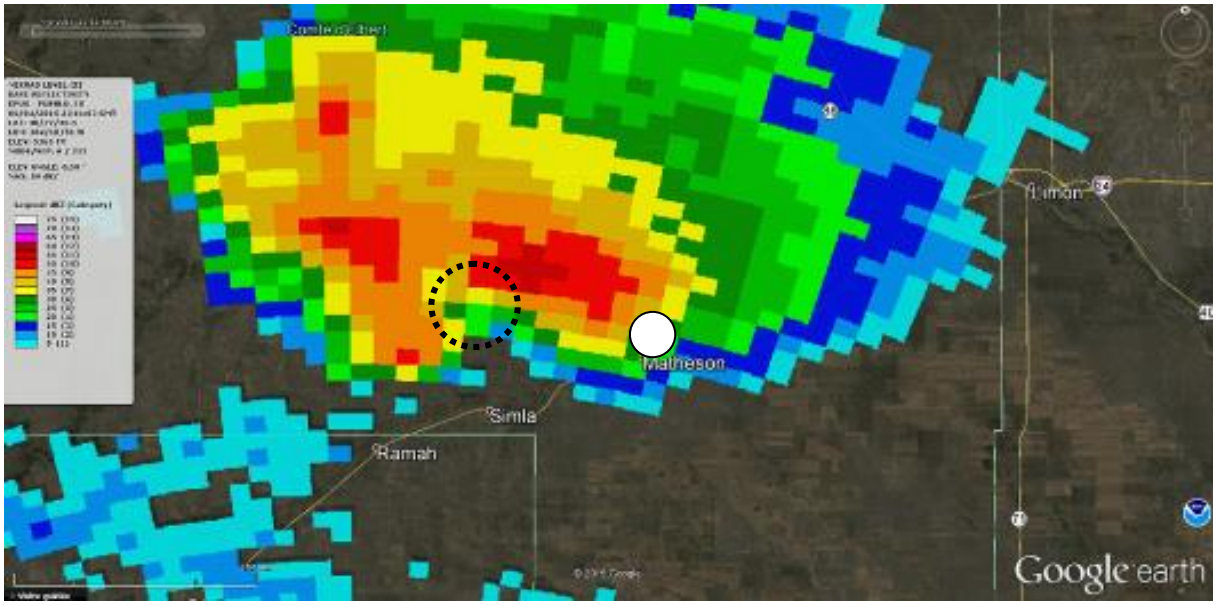


Le panoramique ci-dessous montre bien la présence de deux nuages murs rotatifs trahissant la présence de deux mésocyclones. Celui de droite (1) s'effondre tandis que celui de gauche (2) prend de plus en plus de vigueur. L'image radar de vélocité au même moment indique une rotation nettement plus prononcée sur le second mésocyclone (dipôle de couleur prononcé).

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**



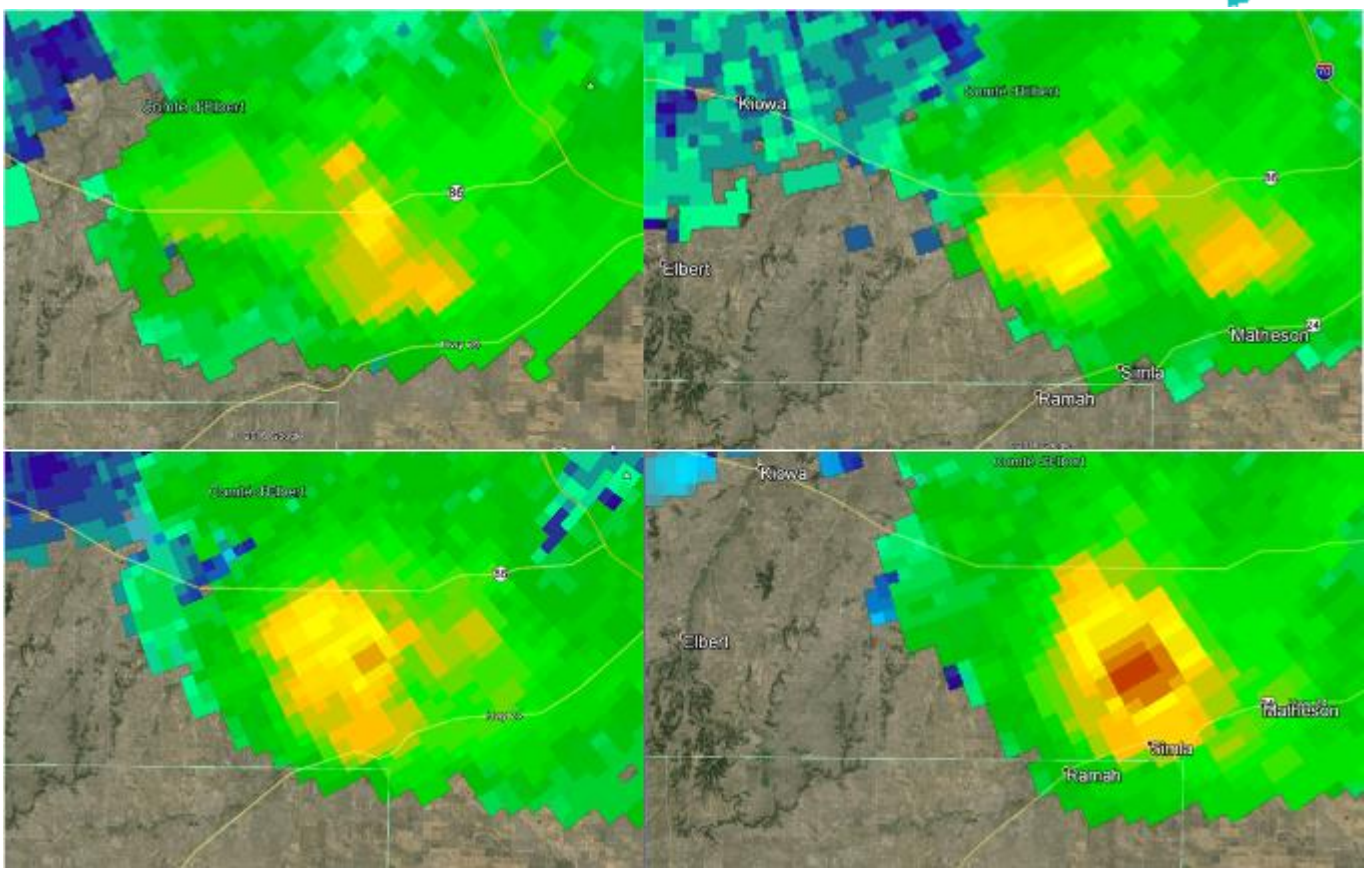
L'existence de ces deux mésocyclones est corroborée par Michael Bath, faisant partie d'une équipe australienne de traqueurs d'orage : « *Il y a un moment où deux mésocyclones étaient très apparents. Les bases étaient fort élevées, mais baissaient au fur et à mesure. L'orage se traînait lentement vers le sud…* ». Durant les minutes qui vont suivre, notre équipe va se décaler à mi-chemin entre Simla et Matheson. Le mésocyclone va se structurer davantage et la rotation du courant ascendant va s'intensifier.



Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

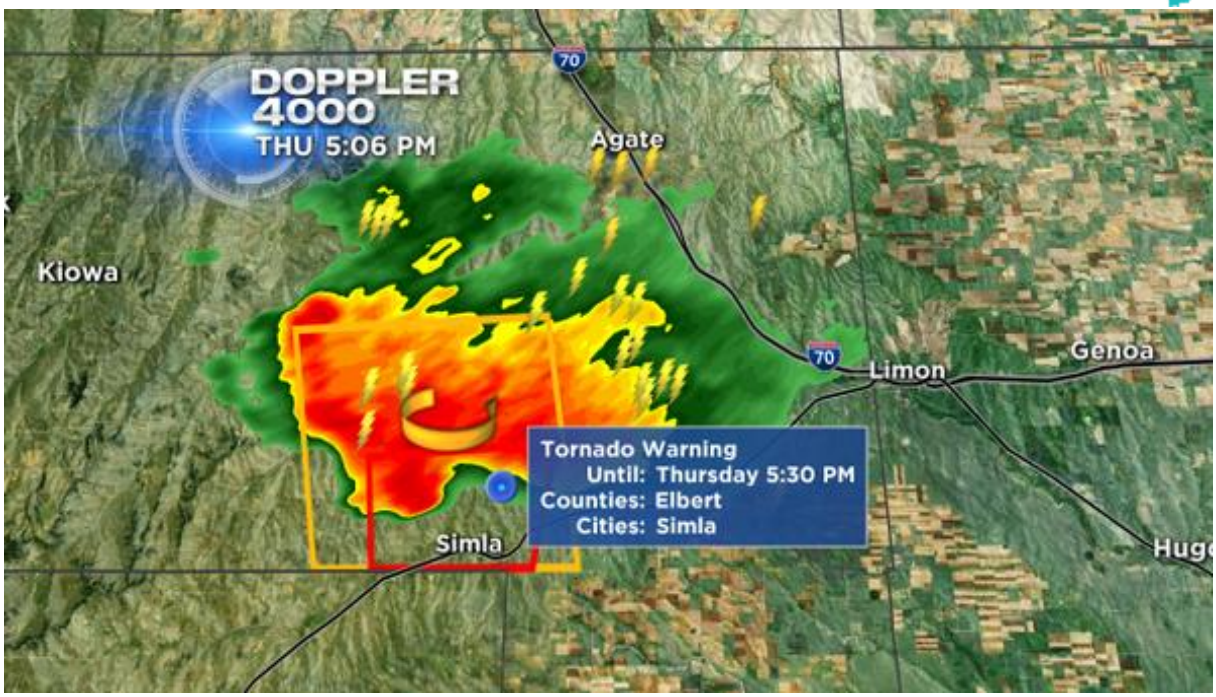
Nous pouvons donc constater que l'orage s'est renforcé considérablement entre 16h00 et 17h00 MDT.

Les images suivantes des « écho tops » permettent de visualiser l'intensité du courant ascendant du fait des particules d'eau ou de glace qui le compose durant cette période. Notons que les échos tops ne sont vraiment fiables que si le radar se situe à une distance suffisante de la cellule orageuse. Dans ce cas-ci, la distance semble suffisante pour permettre de se fier aux images.



À partir de 17h00 MDT, l'orage poursuit son intensification, le nuage mur s'épaissit et finalement, la première tornade se développe aux environs de 17h12 MDT, au nord-ouest de Simla.

Au même moment, un « tornado warning » est délivré pour la région de Simla.



Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1024&overlay=false

Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1025&overlay=false

La tornade a très brièvement touché le sol entre 17h16 et 17h17 MDT.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Voici la position de l'équipe et le parcours de la tornade à 17h16 et 17h17 MDT. La distance entre la tornade et l'équipe est d'environ 8 km.

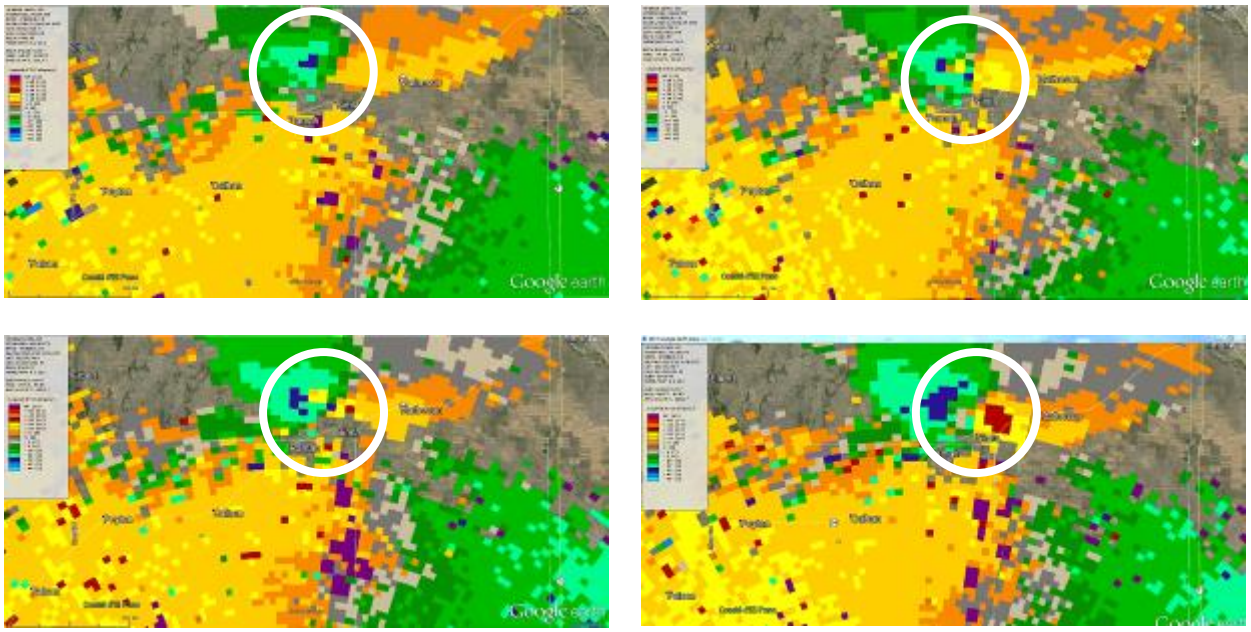
Après une brève rétractation de l'entonnoir, le tuba s'est à nouveau allongé pour toucher le sol une seconde fois, et ce jusque 17h20 MDT, heure de la dissipation complète du phénomène.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

L'équipe était alors un peu plus proche, à moins de 8 km du tourbillon.

Durant cette période donc, deux tornades se sont développées sous la base du même courant ascendant.

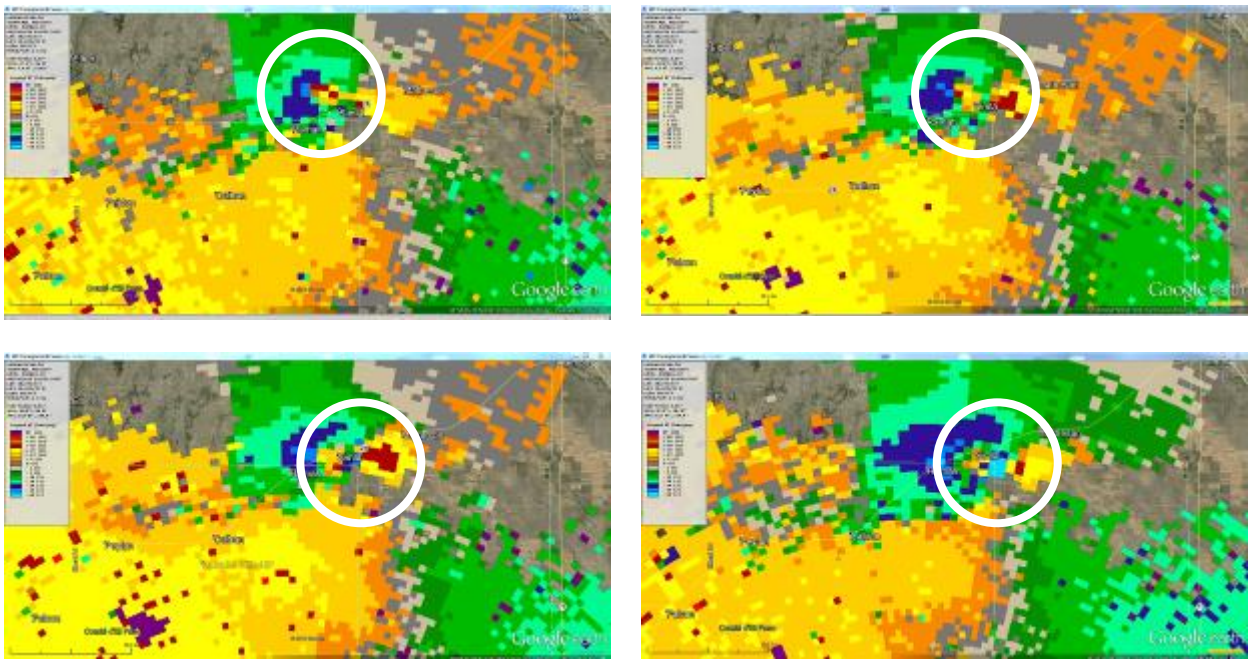
Voici à présent quatre images radars de vélocité entre 17h00 et 17h15 MDT.



Nous pouvons constater que durant ces quinze minutes, le dipôle est de plus en plus prononcé et vaste. Cela signifie que la base du mésocyclone s'intensifie et s'élargit. L'intensification est à son apogée au moment où les deux tornades se développent (entre 17h12 et 17h17 MDT).

Cependant, la durée de vie très brève des deux tornades pourrait être liée à l'intensification de la rotation du mésocyclone lui-même.

Durant la dizaine de minutes qui va suivre, nous pouvons constater sur les images radars doppler que la rotation initiale s'affaiblit tandis qu'une autre zone de rotation, plus franche, se met en place. Au même moment, une troisième tornade se développe à 17h23 MDT. Les images ci-dessous reprennent la situation à 17h25, 17h30, 17h35 et 17h40 MDT.



Celle-ci, plus structurée que la précédente, va perdurer environ 20 minutes et parcourir une distance d'environ 2700 mètres.

Crédit photos : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Source de l'image :
https://www.youtube.com/watch?time_continue=2802&v=MKVKBn4Mgjw&feature=emb_logo

Cette tornade va faire des dégâts, essentiellement aux arbres ainsi qu'à une grange. Son intensité a été estimée au niveau EF1.

Notre équipe va, durant la durée de vie de ce tourbillon, se décaler afin de tenter de trouver une route qui va nous permettre de continuer à suivre l'évolution de l'orage. La *dirt road*[1] qui se présenta offrait malheureusement une très forte dénivellation, ce qui nous a obligé par la suite à repartir vers l'est puis le sud, nous éloignant

[1] Route en terre typique des Etats-Unis.

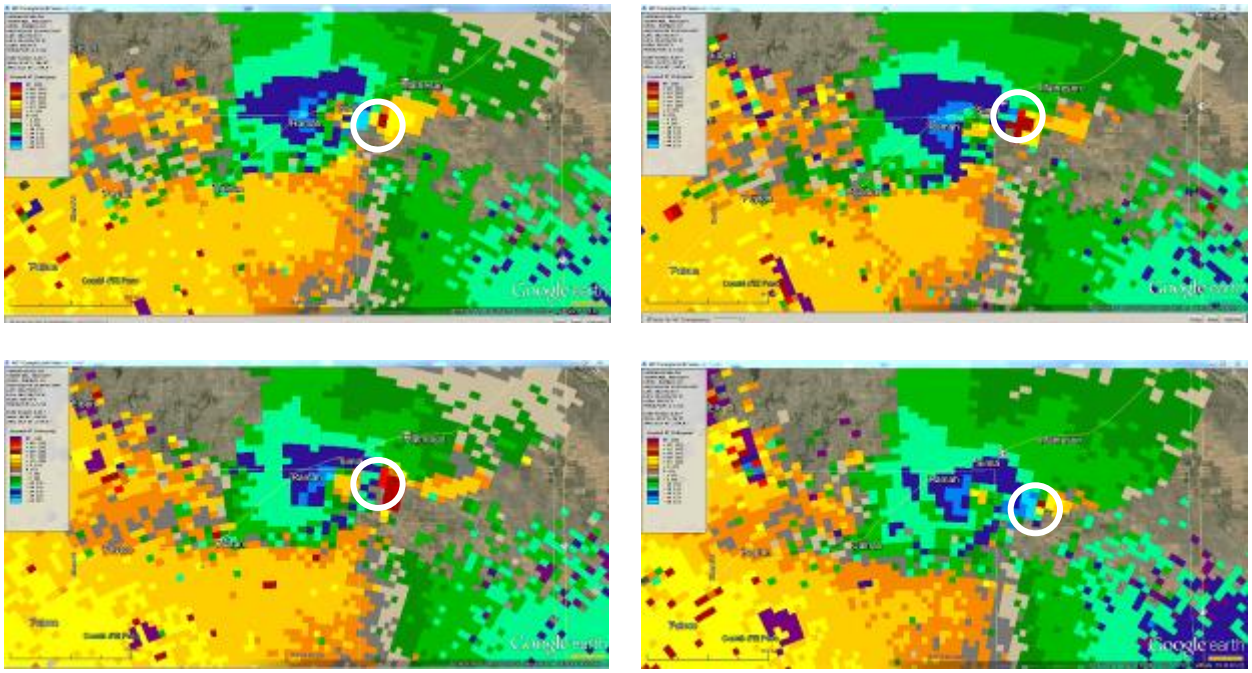
progressivement de l'orage. Au départ, l'équipe se situe à environ 4.7 km de la tornade (à 17h30 MDT), avant de s'éloigner et de se trouver à environ 6.7 km (à 17h40 MDT).

Source de l'image : **www.severestorms.com.au**

À 17h53, une nouvelle brève tornade touche le sol. Celle-ci fait des dégâts essentiellement sur une grange le long de la Kendrick Road, les dommages étant du niveau EF1. Elle ne va persister au sol que durant une minute. Notre équipe ayant du trouver une route plus à l'est à ce moment-là, nous n'avons pas pu l'observer.

L'image ci-après montre la zone touchée par cette brève tornade d'intensité EF1.

Les images radars doppler de vélocité entre 17h40 et 18h00 MDT montrent l'apparition d'une nouvelle zone de rotation plus à l'est par rapport à la précédente. Durant cette période donc, une brève tornade va se développer.



Si on analyse plus en profondeur ces images, nous pouvons constater que les particules de glace et d'eau du courant ascendant s'approchant du radar (couleur bleue) tendent à s'enrouler et former une sorte de crochet. Cela pourrait signifier une intensification du courant descendant de flanc arrière (RFD). Sur la dernière image, le RFD pourrait ainsi être dominant et enrouler la zone de rotation. Cela nous amène à penser que nous avons à ce moment-là une occlusion de la base du mésocyclone.

Les recherches effectuées sur le sujet appuient l'hypothèse que la période amenant une occlusion de la base du mésocylone peut être favorable au développement d'une tornade en y accentuant la vorticité dans la zone de contact entre le RFD et la base du mésocyclone.

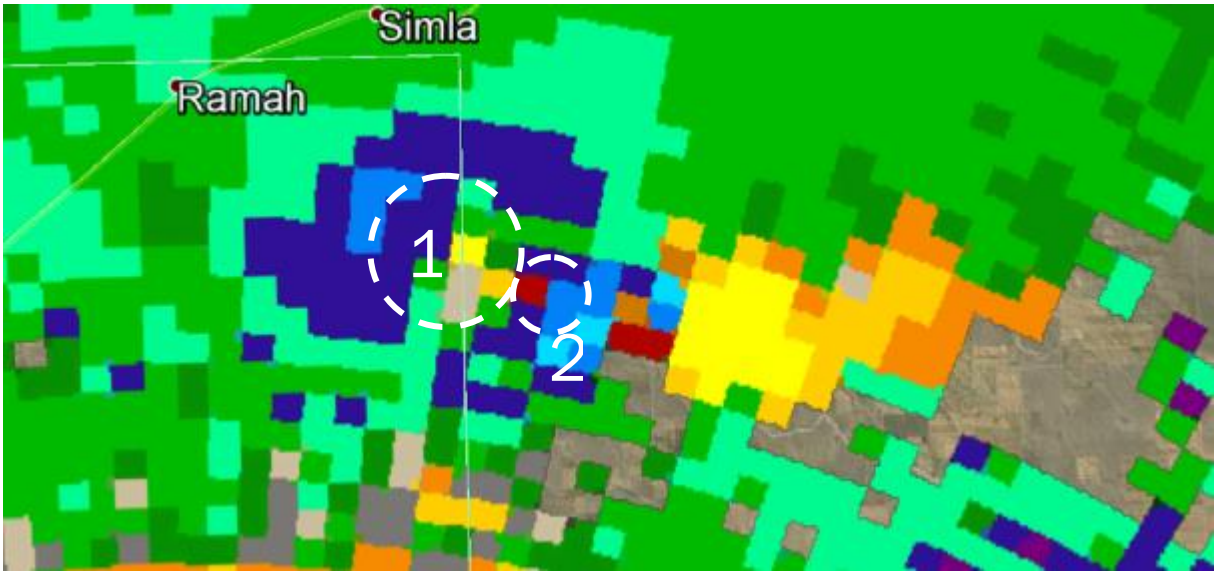
Et effectivement, à ce moment-là, une nouvelle tornade apparait, à 18h00 MDT pour être plus précis. Cette tornade va perdurer assez longtemps (environ 18 minutes) et parcourir une distance supérieure à 8 km. Le vortex ne va toucher que quelques habitations au stade EF0.

Durant la période où sévit cette tornade, d'autres tourbillons à rotation anticyclonique vont se développer. Le premier va se produire à environ 4 km de la position de l'équipe à 18h04 MDT. Celui-ci ne va pas toucher de structures. Il va perdurer au total 4 minutes.

Notre équipe pourra assister à la survenue de cette tornade. Sur la photographie suivante, la tornade à rotation anticyclonique est visible au premier plan tandis que la tornade à rotation cyclonique, bien que légèrement masquée par les précipitations est visible à l'arrière-plan à droite.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Sur l'image radar suivante (zoom), les deux tornades adoptent bien des rotations différentes. La première à rotation cyclonique, la seconde à rotation anticyclonique.



Source de l'image :
https://www.youtube.com/watch?time_continue=2802&v=MKVKBn4Mgjw&feature=emb_logo

Le photographe Kelly Delay a pu photographier l'incroyable nuage mur à ce moment là ainsi que les deux tornades.

Source de l'image : **Kelly De Lay**

À 18h10 MDT, une nouvelle tornade à rotation anticyclonique se développe tandis que la précédente s'estompe. Le tourbillon va se produire à environ 4 km de la position de l'équipe. Le vortex ne va pas toucher de structures. Il va perdurer au total 10 minutes et parcourir une distance approximative de 5 km. Durant le contact de la tornade avec le sol, notre équipe va se décaler quelques kilomètres plus au sud. Lorsque celle-ci se dissipe, nous nous trouvons à une distance approximative de 3 km.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

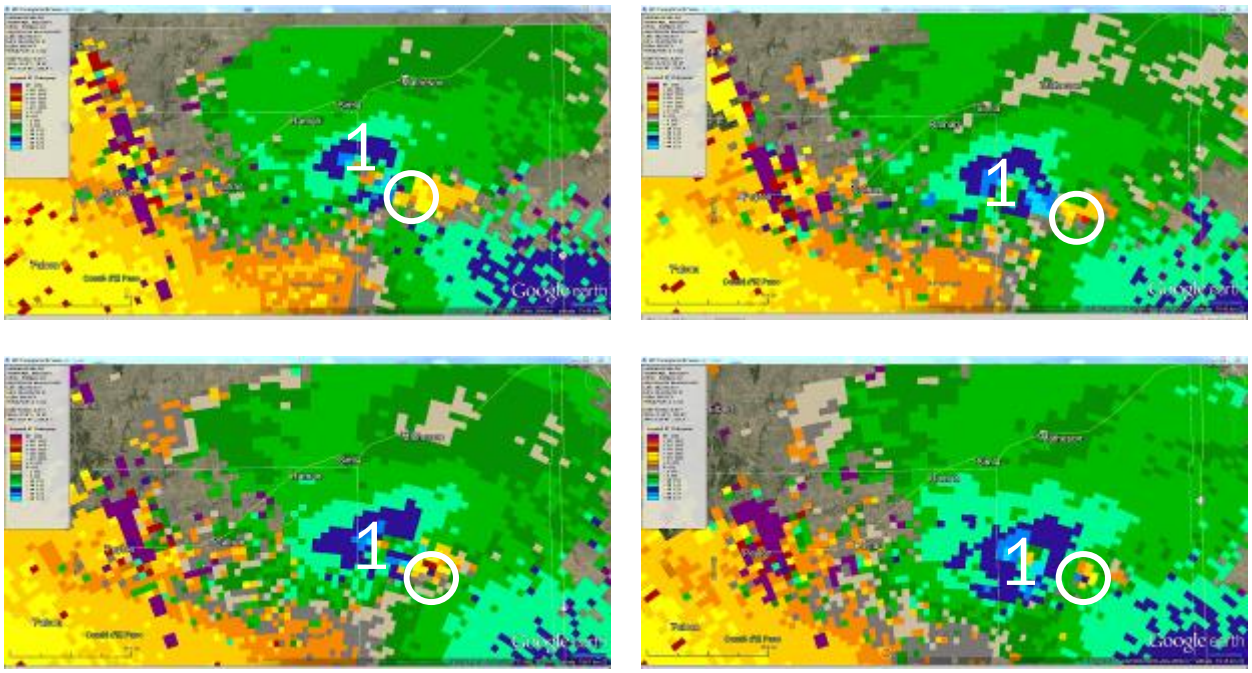
Source de l'image : **Scott Hammel**

Source de l'image : **Scott Hammel**

Crédit photos : **Samina Verhoeven - Belgorage**

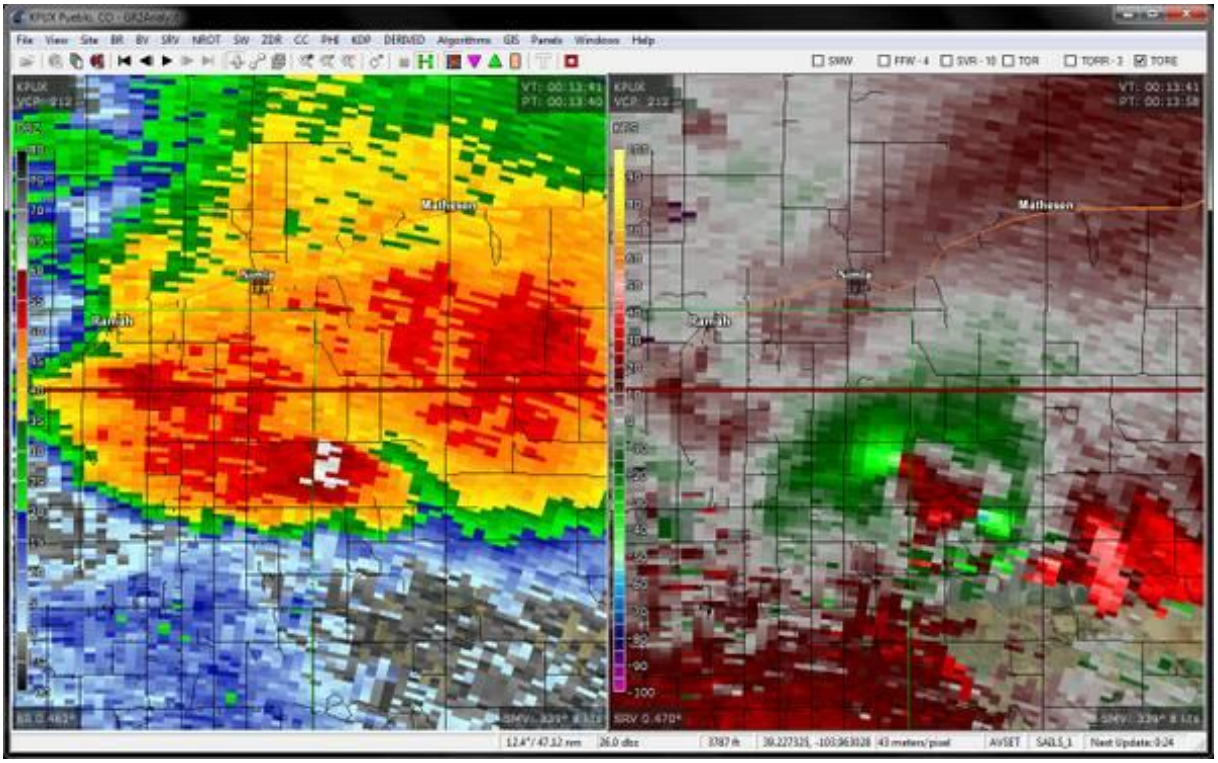
Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Les images radars prises entre 18h15 et 18h30 MDT montrent bien l'apparition d'une nouvelle zone de rotation anticyclonique.



Durant cette période, nous assistons à une nouvelle accentuation du RFD qui entoure la zone de rotation principale (1). Les ronds blancs montrent la zone de rotation anticyclonique.

La radar doppler mesure bien deux zones de rotation (image de droite), l'une cyclonique et l'autre anticyclonique.



Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1034&overlay=false

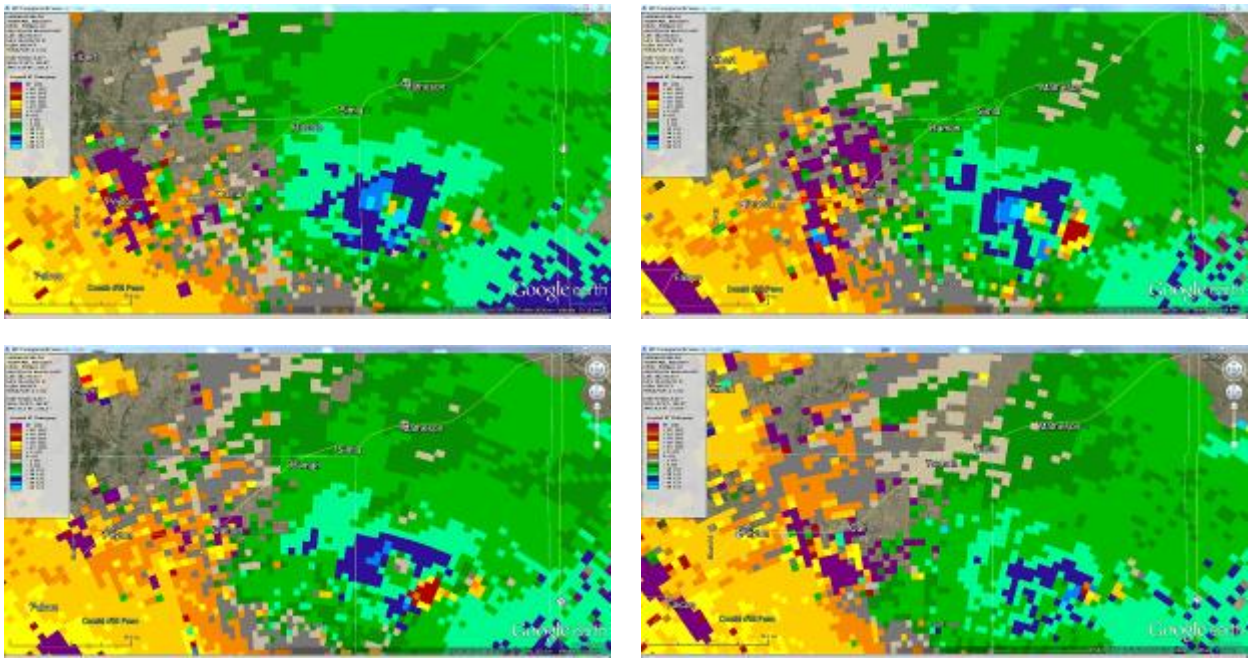
Durant la phase de dissipation de la tornade anticyclonique, un autre tourbillon également à rotation anticyclonique se développe à 18h25 MDT. Celui-ci va perdurer pendant environ 11 minutes mais durant la première partie de son parcours, la tornade va régulièrement effectuer des « touch and go[2] ». Elle va parcourir une distance approximative de 3 km. Le tourbillon va sévir à une distance d'environ 4 à 6 km de l'équipe de Belgorage, le point le plus proche étant celui de la phase de dissipation de la tornade.

[2] Comportement de tornades instables caractérisé par de régulières pertes de contact avec le sol.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Reprenons à présent les images radars entre 18h30 et 18h50 MDT.



Nous constatons à nouveau que la zone de rotation principale est dominée par la présence du RFD (couleur bleue) tandis que la zone de rotation anticyclonique est plus marquée au moment où la nouvelle tornade se développe. A 18h50 MDT, cette dernière zone de rotation s'affaiblit et la tornade se dissipe.

Une nouvelle et dernière tornade s'est développée très furtivement aux environs de 19h10 MDT. Celle-ci ne provoquera aucun dégât.

Crédit photo : **Samina Verhoeven - Belgorage**

Les dernières photos, montrant le nuage mur en état de dissipation, ont été prises entre 19h00 et 20h00 MDT, entre Rush et Punkin Center, depuis la route 94, puis 71.

Crédit photo : **Jean Yves Frique - Belgorage**

Crédit photo : **Jean Yves Frique - Belgorage**

La durée totale de la supercellule est estimée à environ 4 heures, entre 16h00 et 20h00 MDT, et même plus si l'on tient compte de la phase de développement de la cellule qui, comme précisé au début de ce chapitre, a eu lieu entre 15h00 et 16h00 MDT.

Outre les tornades, la supercellule de Simla a produit d'énormes grêlons dont certains ont pu atteindre les 10 cm de diamètre.

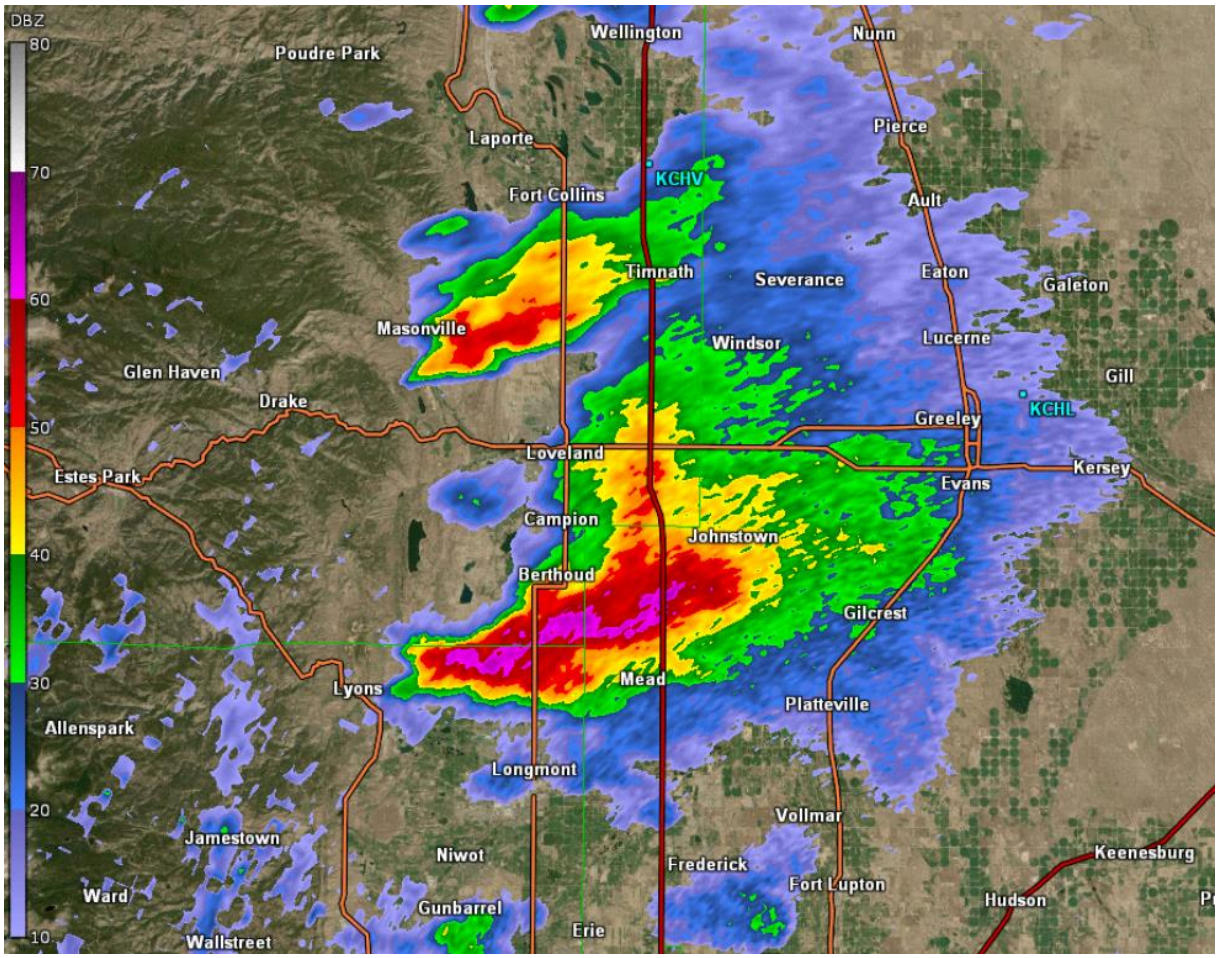
Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1037&overlay=false

Source de l'image :
https://embed.scribblelive.com/Embed/v7.aspx?Id=1095244&Page=1045&overlay=false

10. La tornade de Berthoud

Quelques heures après la survenue des tornades de Simla, un autre orage de type supercellulaire s'est développé au nord de Denver. Celui-ci a surtout produit une puissante tornade d'intensité EF3. Les dégâts en résultant ont été très importants.

Source de l'image :
https://www.gannett-cdn.com/media/2015/06/05/FortCollins/FortCollins/635691178696013087-FTC0605-TORNADO002.jpg?width=2560



Imagerie radar de réflectivité de la supercellule de Berthoud –
Source de l'image : **NOAA**

11. Conclusion

Pour clôturer ce dossier, nous dirons que l'orage supercellulaire de Simla restera certainement une expérience inédite en terme d'observation de tornades pour notre collectif car ce n'est pas tous les jours qu'un tel événement se produit et ce même aux États-Unis. C'était donc avec assiduité que nous désirions partager le fruit de nos recherches afin de permettre à tout un chacun qui consulte ce dossier, de découvrir la genèse et comprendre les mécanismes de cet orage extraordinaire.

12. Sources et références

https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/MWR-D-15-0304.1

https://www.researchgate.net/publication/262997349_The_Role_of_Multiple-Vortex_Tornado_Structure_in_Causing_Storm_Researcher_Fatalities

https://stormtrack.org/community/threads/rfd-additional-energy-source.23671/

http://stevehorstmeyer.blogspot.com/2013/06/occluding-mesocyclones-evidence-from-el_22.html

http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/torn/dgr/evsch.rxml

http://nwafiles.nwas.org/jom/articles/2019/2019-JOM4/2019-JOM4.pdf

http://www.k5kj.net/dcvz.htm

https://mesonet.agron.iastate.edu/

https://www.youtube.com/watch?v=pr6iGk3Z8Fk

https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120001276.pdf

https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/MWR3296.1?mobileUi=0

http://thevane.gawker.com/how-did-the-rare-twin-tornadoes-in-nebraska-form-1592157507

https://www.ustornadoes.com/2018/04/14/a-comprehensive-radar-examination-of-the-april-14-2012-tornado-outbreak/

http://weerhoekoostvlaanderen.blogspot.com/2014/02/

https://highwaysandhailstones.com/chasers/nzpchasers/june-4th-2015-simla-co-tornadoes/

https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=yy4NOgsYdDc

http://nwafiles.nwas.org/jom/articles/2019/2019-JOM4/2019-JOM4.pdf

http://www.k5kj.net/dcvz.htm

https://www.weather.gov/bou/BerthoudTornado2015

https://www.weather.gov/bou/StormSurveys

https://www.ncdc.noaa.gov/stormevents/eventdetails.jsp?id=590625

http://www.lightningphotography.com/simla_matheson_colorado_tornadoes.html

http://www.stormeffects.com/2015_Colorado_Tornadoes.htm

https://www.youtube.com/watch?v=JzVpgbvRLFY

https://www2.mmm.ucar.edu/imagearchive/index.html

https://www.youtube.com/watch?v=LYubHpEMTPM

https://xtremchasequebec.com/2015/10/29/pourquoi-certains-orages-produisent-plusieurs-tornades/

https://www.spc.noaa.gov/exper/archive/event.php?date=20150604

http://www.theweatherprediction.com/weatherpapers/104/index.html

https://satelliteliaisonblog.files.wordpress.com/2017/06/20170629_co_vis4.gif

https://www.spc.noaa.gov/exper/envbrowser/

https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/sfc-zoom.php?h=18&y=2015&m=06&d=04

https://www.denverpost.com/2014/05/22/history-of-tornadoes-in-colorado-1950-2013-interactive-graphic/

https://www.midsouthtornadoes.msstate.edu/index.php?cw=bou

http://www.tornadohistoryproject.com/tornado/Colorado/2015/map

https://www.ustornadoes.com/2015/06/03/heres-where-tornadoes-typically-form-in-june-across-the-united-states/

https://www.youtube.com/watch?v=UGlTKyNSFZE

https://www.weather.gov/gid/102204

http://stormeyes.org/latest/tag/cheyenne/

http://www.tornadohistoryproject.com/tornado/2004/May

https://www.youtube.com/watch?v=6EfLZBqIzTo

https://www.youtube.com/watch?v=7W_s32dDgHY

https://www.youtube.com/watch?v=TBjr-nvA2Jg