Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'intérieur DFI
Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse

MétéoSuisse

Rapport technique MétéoSuisse Nº 287

Orage dévastateur du 24 juillet 2023 à La Chaux-de-Fonds

MétéoSuisse

ISSN-2296-0058

Rapport technique MétéoSuisse Nº 287

Auteurs : Lionel Peyraud, Aude Untersee, Stephan Vogt, Marco Stoll, Barbara Galliker, Isabelle Bey

Version du 16.04.2024

Citation recommandée :

MétéoSuisse : 2024, Orage dévastateur du 24 juillet 2023 à La Chaux-de-Fonds, *Rapport technique MétéoSuisse,* **287,** 56 pp.

Editeur :

Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse, © 2024

MétéoSuisse
Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

Résumé

Le 24 juillet 2023 en matinée, des cellules orageuses évoluent dans une masse d'air préfrontale modérément instable et fortement cisaillée sur le quart nord-est de la France et l'ouest de la Suisse. L'une de ces cellules adopte une structure arquée et produit quelques premières fortes rafales en Bourgogne (France), avant de montrer des signes d'affaiblissement en s'approchant du Doubs. Toutefois, en s'approchant de la frontière suisse, celle-ci regagne soudainement en puissance et évolue en orage supercellulaire. Cet orage aborde Le Crêt-du-Locle et la ville de La Chaux-de-Fonds, provoquant de violentes rafales de vent sur la région en l'espace d'une dizaine de minutes. L'anémomètre de l'aérodrome des Éplatures enregistre alors une rafale sur 1 s de 217 km/h.

Une analyse menée grâce à un vaste ensemble de données d'observation permet d'émettre une hypothèse sur l'origine des très violentes rafales associées à cet orage. Les rafales destructrices semblent être la résultante de plusieurs processus opérant à différentes échelles, y compris des éléments liés au régime météorologique à grande échelle, d'autres en rapport à l'environnement à la méso-échelle et certains rattachés à l'échelle de l'orage lui-même. Le phasage de ces éléments, intervenu juste en amont de La Chaux-de-Fonds, explique la virulence des rafales orageuses et les dommages considérables qu'elles ont causés. Les dégâts observés révèlent le caractère hybride du phénomène avec par endroits des dommages rectilignes et divergents infligés à la végétation, cohérents avec la thèse de microrafale et dans d'autres secteurs, des arbres couchés dans des directions clairement convergentes, en adéquation avec le passage d'une tornade.

La valeur de rafale maximale de 217 km/h sur 1 s mesurée aux Éplatures se situe juste au-delà de la plage de validité de l'instrument de mesure. D'un point de vue climatologique, cette rafale survenue en situation convective est difficile à comparer aux rafales de même ordre de grandeur relevées lors de tempêtes hivernales et, bien que des tornades se soient déjà produites dans le Jura, de telles valeurs n'ont jamais été mesurées. Néanmoins, le déroulement de l'événement, l'entretien de la station, le contrôle opérationnel de la qualité des données ainsi que les comparaisons aux mesures effectuées à proximité et les photos des dégâts rendent la valeur mesurée plausible. En l'absence d'une meilleure approximation de la réalité, la valeur mesurée est considérée comme valide et conservée pour une utilisation ultérieure dans le cadre d'analyses climatologiques.

Une pré-alerte avait été émise la veille pour « orages violents possibles » valable le 24.07 de 00h à 22h. A court terme, la nature isolée et explosive du phénomène ainsi que sa rapidité de déplacement en ont compliqué le suivi. L'absence d'indicateurs et de mesures en temps réel de violentes rafales au sol sur le territoire français en amont n'a pas permis de soupçonner la sévérité réelle de la cellule. L'intensité de la cellule estimée n'a pas atteint les seuils permettant de déclencher un Flash-Orage (FO) automatique. La cellule a été avisée par un FO en aval de La Chaux-de-Fonds sur le reste de sa trajectoire.

Abstract

On the morning of July 24, 2023, scattered thunderstorm activity was ongoing in a moderately unstable, highly sheared prefrontal air mass over the northeast quarter of France and western Switzerland. One of these cells evolved into a bow-echo thunderstorm and produced some initial severe wind gusts in Burgundy (France), before weakening as it headed towards the Doubs region. As it approached the Swiss border, the cell rapidly regained in strength and developed into a supercell thunderstorm. As this storm bore down on the town of Le Crêt-du-Locle and the city of La Chaux-de-Fonds, it produced widespread severe wind gusts in the span of about ten minutes. The anemometer at Les Éplatures aerodrome recorded a 1-s wind gust of 217 km/h.

A post-event analysis carried out with the help of an extensive set of observational data led to a hypothesis as to the origin of the very violent wind gusts associated with this storm. The destructive winds appear to be the result of a number of processes operating simultaneously at different spatial and times scales. The phasing of these elements just upstream of La Chaux-de-Fonds, seems to explain the extreme nature of the thunderstorm gusts and the considerable damage they caused to infrastructure and vegetation. More specifically, the damage observed helped reveal the hybrid nature of the event, composed of straight-line and/or diverging damage to vegetation along one corridor, consistent with the passage of a microburst, and on the other, trees downed in a clearly converging pattern along a second separate corridor, consistent with the passage of a tornado.

The maximum 1-s wind gust value of 217 km/h measured at Les Éplatures aerodrome lies just beyond the validity range of the measuring instrument. From a climatological standpoint, this convective wind gust is difficult to compare with gusts of the same order of magnitude recorded during extratropical synoptic winter storms, and although tornadoes have already occurred along the Jura chain, such extreme values have never been measured. Nevertheless, the measured value certainly seems plausible given the way the event unfolded, the adequate maintenance of the station, the operational quality control of the data and given the comparisons with nearby measurements and photos of the observed damage. In the absence of a better approximation to reality, the value measured is considered valid and retained for future use in climatological analyses.

A severe thunderstorm outlook had been issued the previous day for "possible severe thunderstorms", valid for 24.07 from 00:00 to 22:00 local time. In the very short-term nowcasting timeframe, the isolated and sudden nature of this violent phenomenon, as well as its rapid displacement, made it difficult to monitor. The absence of clear-cut indicators and of real-time wind gust measurements on the ground over France as the cell was approaching meant that the actual severity of the cell was not suspected. The cell's estimated intensity did not reach the thresholds required to trigger an automatic Flash-Orage (FO) severe thunderstorm warning. The cell was warned by a FO downstream of La Chaux-de-Fonds for the rest of its trajectory.

Table des matières

Résumé **5**

Abstract **6**

1 Introduction **9**

2 Contexte météorologique synoptique **12**
2.1 Situation à large échelle 12
2.2 Situation à la méso-échelle 14
2.2.1 Instabilité de la masse d'air 14
2.2.2 La dynamique de basses couches 15
2.2.3 Effets du relief du Jura et du vallon de La Chaux-de-Fonds sur l'intensité de l'orage 17
2.2.4 Effets de l'air sec du panache ibérique sur l'intensité de l'orage en amont 18

3 Description de l'évolution orageuse à l'aide de données radar, satellite, foudre et des mesures des stations au sol **20**
3.1 La structure orageuse vue par radar et satellite 20
3.1.1 Phase arquée de l'orage 21
3.1.2 Phase d'affaiblissement de l'orage 22
3.1.3 Phase supercellulaire de l'orage 23
3.1.4 Phase d'affaissement et d'écroulement de la cellule 24
3.1.5 Présence supplémentaire probable d'une circulation tornadique de micro-échelle 25
3.1.6 Phase finale d'affaiblissement de la ligne orageuse 26
3.1.7 Signatures radar de présence de grêle 27
3.2 Données foudre 28
3.3 Données au sol 29

4 Caractérisation de l'événement à travers les dégâts observés et les mesures de vents **32**
4.1 Analyse des dégâts observés 32
4.1.1 Photos 32
4.1.2 Flanc nord : dégâts convergents, d'aspect tornadique 33
4.1.3 Flanc sud : dégâts souvent linéaires, de type microrafale 34
4.2 Valeur de vent mesuré et plausibilité 35
4.2.1 Situation de la station de mesure 35
4.2.2 Appareil de mesure 36
4.2.3 Certification 36

4.2.4	Contrôle opérationnel de la qualité des données	37
4.2.5	Saisie des valeurs de mesure et traitement des signaux	37
4.2.6	Plausibilité des valeurs mesurées	38
4.3	Conclusion sur la caractérisation de l'événement	39
5	**Mise en contexte climatologique**	**42**
5.1	Classification temporelle de la rafale relevée dans la série de mesures de La Chaux-de-Fonds	42
5.2	Classement spatial de la valeur mesurée	43
6	**Performance des outils et modèles, avertissements émis**	**45**
6.1	Modèles de prévision numérique	45
6.2	Avertissements émis	49
7	**Communication et retombées médiatiques**	**50**
8	**Conclusion**	**52**
Références		**53**
Remerciements		**55**

1 Introduction

Le 24 juillet 2023 en fin de matinée, une cellule orageuse a transité depuis la région du Doubs jusque dans le vallon de Saint-Imier (régions identifiées sur la carte ci-dessous) et a occasionné, du Crêt-du-Locle à La Chaux-de-Fonds, des dégâts matériels considérables, une quarantaine de blessés ainsi qu'un décès suite à la chute d'une grue.

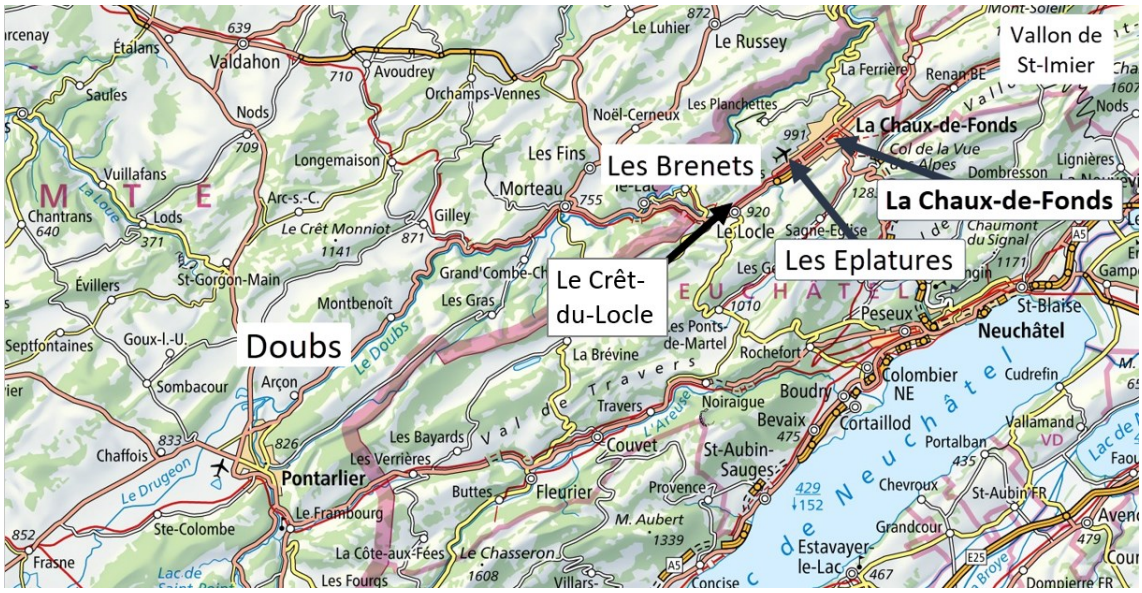

Figure 1 : carte générale des régions balayées par la cellule orageuse. Source : Swisstopo

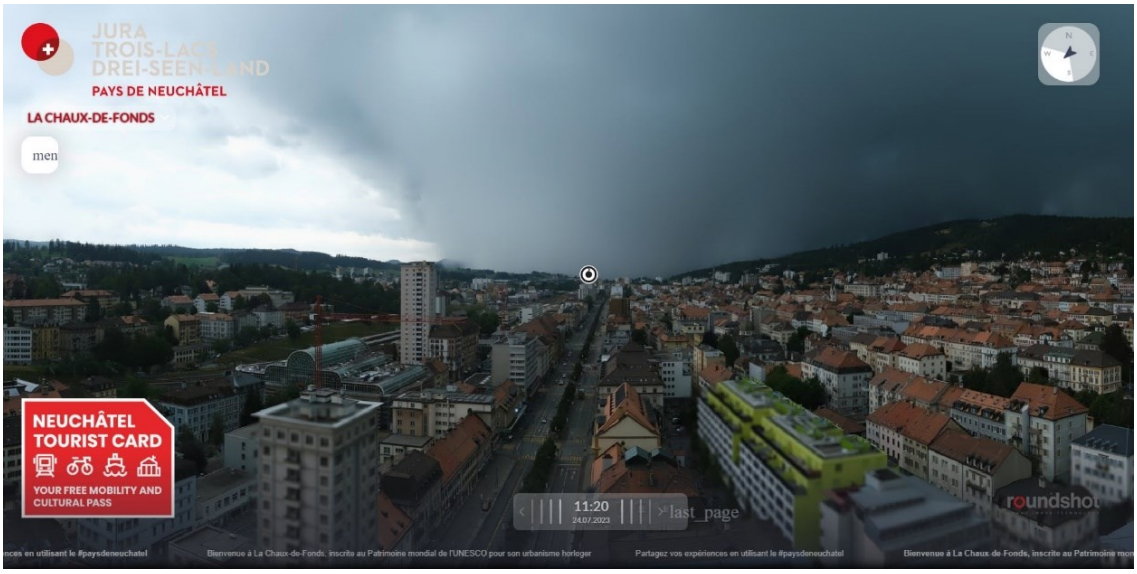

Figure 2 : l'orage en approche, vu depuis La Chaux-de-Fonds, à 11h20 locales le 24 juillet 2023. Photo : webcam Roundshot

Les dommages observés sur le terrain et rapidement reportés via les observations météo de l'application MétéoSuisse (**Figure 3** ci-dessous) témoignent de vents extrêmes au passage de cet orage.

Le présent rapport donne un éclairage sur cette situation extrême à travers les ingrédients météorologiques à large échelle, l'évolution et la caractérisation de la structure orageuse, la mise en contexte climatologique, la performance des prévisions et des modèles ainsi que sur les moyens de communication mis en œuvre par MétéoSuisse.

Le rapport s'articule comme suit : le **chapitre 2** présente la situation synoptique ; le **chapitre 3** s'intéresse à l'évolution de la structure orageuse ; le **chapitre 4** se focalise sur la caractérisation de l'événement ; le **chapitre 5** en propose une mise en contexte climatologique ; le **chapitre 6** illustre la performance des outils et modèles ; enfin, le **chapitre 7** documente la stratégie de communication de MétéoSuisse et les échos médiatiques que celle-ci a suscités.

Figure 3 : arbres couchés, toitures arrachées, poteaux pliés près du Crêt-du-Locle, juste après le passage de l'orage. Photo partagée à 11h20 dans les observations météo de l'App MétéoSuisse.

2 Contexte météorologique synoptique

Tout phénomène météorologique violent naît dans un contexte atmosphérique particulier qui combine plusieurs facteurs à différentes échelles. La puissance de l'orage dévastateur du 24 juillet 2023 est en partie liée à certains ingrédients de dynamique atmosphériques connus, réunis ce jour-là sur la région alpine, qui font l'objet de ce chapitre.

2.1 Situation à large échelle

Durant la matinée du 24 juillet 2023, l'ouest de la Suisse se trouve sous l'influence d'un puissant courant de sud-ouest en altitude dans une masse d'air préfrontale modérément instable à l'avant d'un front froid situé sur le quart nord-est de la France. Le flux à 300 hPa (9 km d'altitude) se caractérise par un courant cyclonique et dynamique (vents de l'ordre de 110 à 150 km/h) lié à un vaste talweg dont l'axe était centré sur le proche Atlantique (**Figure 4**). A l'avant de l'axe circulent des maxima de jet (ondes courtes) dans un fort flux de SW avec un couplage dynamique caractéristique (sortie froide - entrée chaude) qui se matérialise sur l'ouest de la Suisse en matinée du 24 juillet. Cette configuration est connue pour favoriser un soulèvement important de la masse d'air à large échelle.

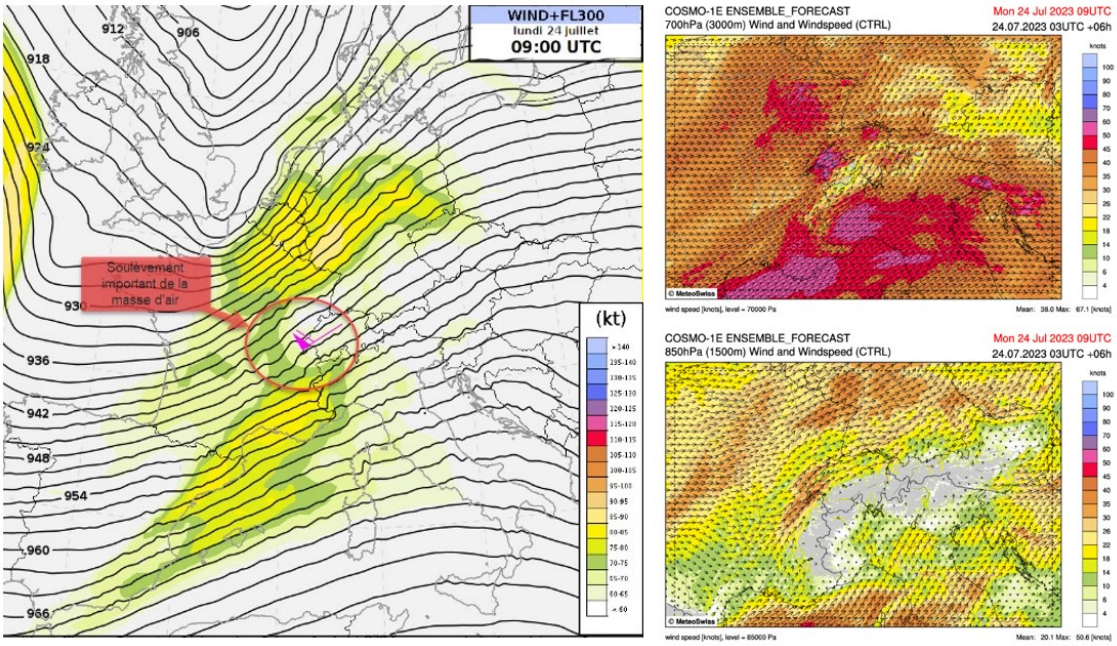

Figure 4 : à gauche, couplage sortie froide-entrée chaude de jet visible au-dessus de la Suisse à 300 hPa (environ 9 km d'altitude) avec axe du talweg sur le proche Atlantique, le 24.07.2023 à 09 UTC. Source : ECMWF-IFS via NinJo. A droite : Direction et force du vent moyen prévus par le modèle COSMO-1 CTRL, le 24.07.2023 09 UTC, à 700 hPa en haut et à 850 hPa en bas. Source : MétéoSuisse.

Le couplage dynamique avec la présence d'ondes courtes est également visible à 500 hPa (environ 5500 m, non montré ici) avec l'identification de coupures de jet, renforçant la tendance observée à 300 hPa. Les valeurs de cisaillement profond (variation de force du vent entre 0 et 6 km) sont de

l'ordre de 80 à 120 km/h, celles du cisaillement de basses couches (variation de force du vent entre 0 et 3 km) de l'ordre de 80 à 110 km/h.

Ce flux à 700 hPa est moyennement humide sur le NE de la France et La Chaux-de-Fonds. En amont du flux, une composante d'air plus sec de type continental tropical (appelé parfois « Spanish Plume ») remonte depuis la péninsule ibérique en direction du centre de la France et de la région alpine (**Figure 5** à gauche, Theta-E 700 hPa 48-57 °C). Cette masse d'air a également une caractéristique tropicale à 850 hPa mais devient plus humide et maritime (influencée par la Méditerranée) à mesure qu'on s'approche du sol (**Figure 5** à droite, Theta-E 54-60 °C).

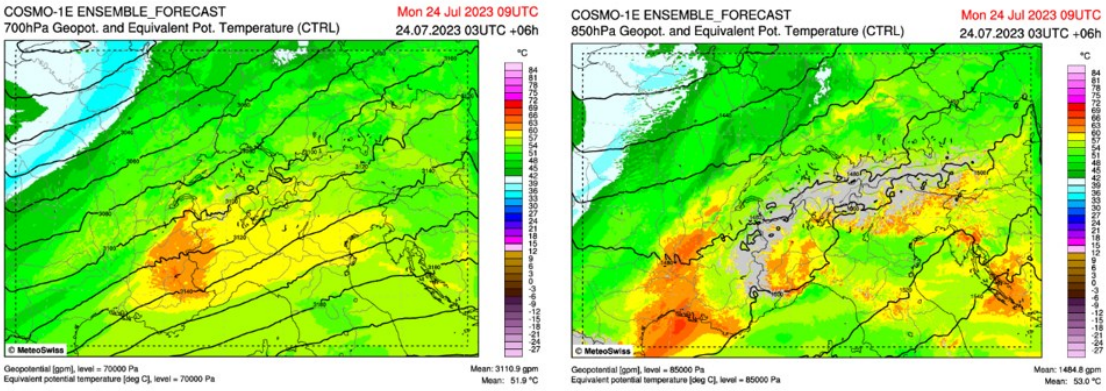

Figure 5 : température potentielle équivalente prévue par COSMO-1 CTRL, à 700 hPa à gauche et à 850 hPa à droite, le 24.07.2023 à 09UTC. Source : MétéoSuisse

Cette masse d'air maritime tropical un peu plus chaude et humide à 850 hPa est advectée vers le nord-est en cours de matinée du 24 juillet sous forme de jet de basses couches (60 à 80 km/h) remontant depuis la Méditerranée en direction de l'Arc jurassien.

Au niveau du sol, un front froid se situe sur le quart NE de la France, orienté SW-NE sur un axe Clermont-Ferrand-Strasbourg et fournit le soulèvement de basses couches nécessaire pour l'initiation de cellules orageuses sur la vallée de la Saône et en direction de la région du Doubs (**Figure 6**).

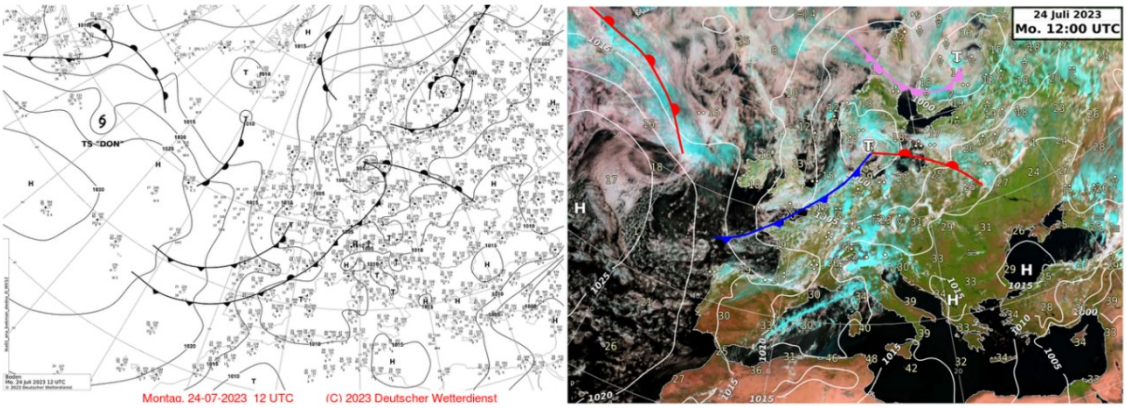

Figure 6 : cartes d'analyse au sol du DWD (à gauche) et de MétéoSuisse avec image satellite visible (à droite), valides le 24.07.2023 à 12UTC. Source : Deutscher Wetterdienst et MétéoSuisse

2.2 Situation à la méso-échelle

Plusieurs éléments pertinents à la méso-échelle semblent avoir joué un rôle dans la virulence de l'évènement orageux qui a touché La Chaux-de-Fonds. Ces éléments sont décrits ci-après, à l'appui de champs modèles prévus par le run déterministe (abrégé CTRL) du modèle COSMO-1E.

2.2.1 Instabilité de la masse d'air

Les valeurs d'instabilité de la masse d'air préfrontale durant la matinée du 24 juillet sur le quart nord-est de la France et sur l'ouest de la Suisse étaient faibles à modérées. Celles-ci variaient passablement d'un endroit à l'autre, notamment sur la zone allant de la vallée de la Saône à la région du Doubs en raison de cellules orageuses déjà en activité à travers cette région. Celles-ci ont modifié à la baisse l'énergie disponible pour les cellules remontant depuis le SW en fin de matinée, comme anticipé par les prévisions successives de COSMO-1 CTRL (voir **Figure 7**).

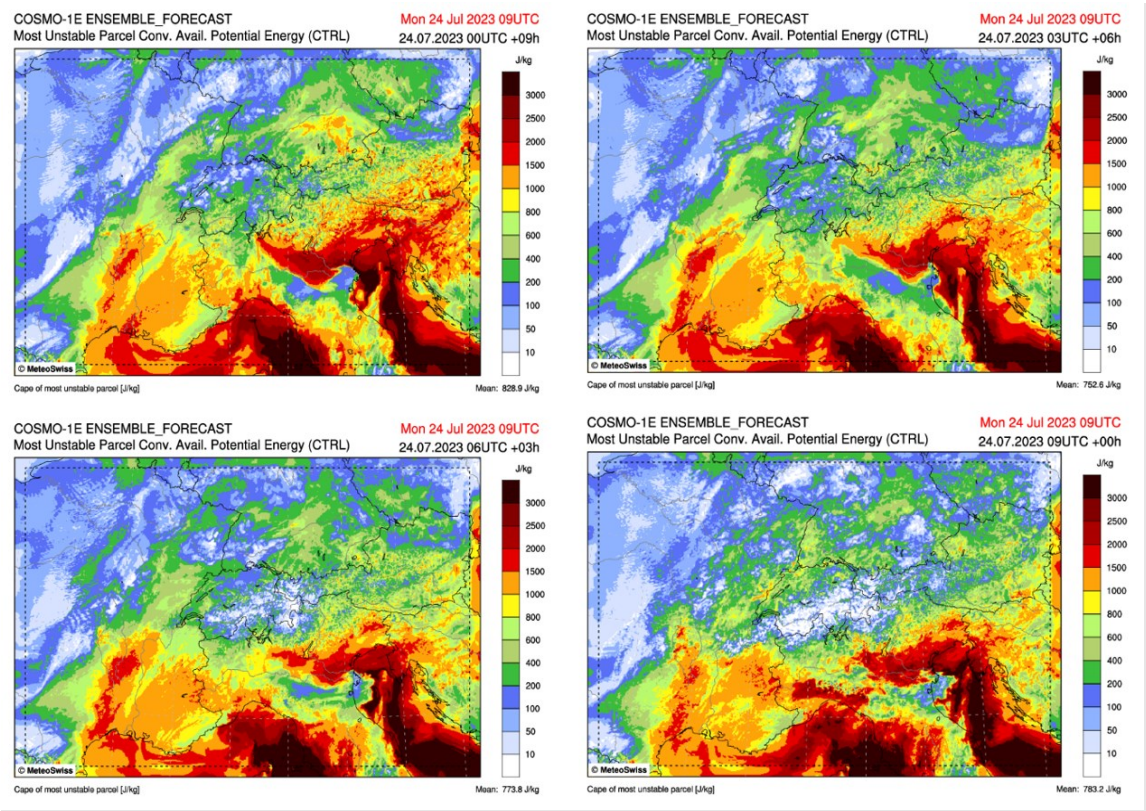

Figure 7 : MUCAPE prévue le 24.07.2023 à 09 UTC par COSMO-1 CTRL, runs de 00 UTC (haut à gauche), 03 UTC (haut à droite), 06 UTC (bas à gauche) et 09 UTC (bas à droite). Source : MétéoSuisse

Pour jauger le potentiel orageux d'une masse d'air, le champ de MUCAPE (Must Unstable Convective Available Potentiel Energy) est souvent utilisé car il représente l'instabilité de l'air, c'est-à-dire sa capacité à s'élever et donc à générer des orages. En situation orageuse estivale classique, les valeurs de CAPE sont typiquement de l'ordre de 1500 à 3000 J/kg. Ces valeurs varient en fonction de l'ensoleillement, de l'humidité de basses couches, du taux de décroissance de température en altitude et d'éventuelles contaminations provoquées par d'autres cellules orageuses.

Le sondage (profil de température et du point de rosée) prévisionnel de COSMO-1 à 09 UTC le 24.07.2023 en un point situé proche de La Chaux-de-Fonds présenté dans la **Figure 8** permet d'estimer une fourchette de valeurs d'instabilité en fin de matinée de l'ordre de 400 et 1200 J/kg de ML/MUCAPE, très localement jusqu'à 1500 J/kg.

Cette instabilité limitée de la masse d'air s'est accompagnée de valeurs du Lifted Index (LI) comprises entre -2 et -6 °C (**Figure 8**, partie droite), laissant supposer des vitesses ascensionnelles modérées à fortes dans les cellules orageuses.

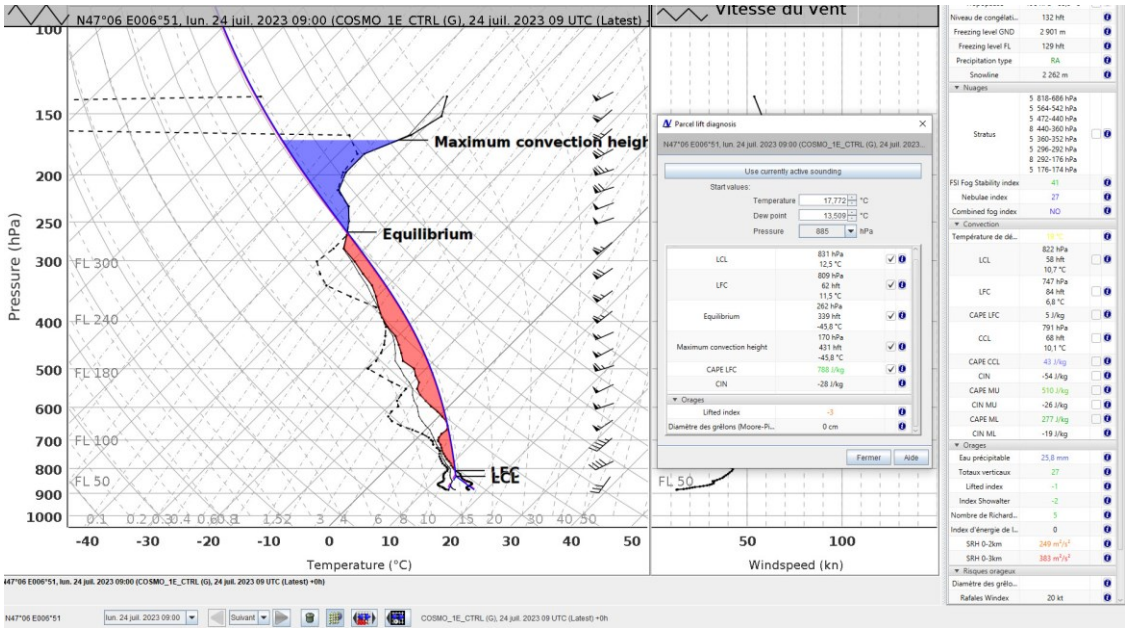

Figure 8 : sondage prévisionnel du modèle COSMO-1 CTRL sur un point à proximité de La Chaux-de-Fonds valide à 09 UTC le 24.07.2023 basé sur le run de 09 UTC. La surface rouge représente la CAPE. Source : MétéoSuisse

Ce sondage prévisionnel généré par le modèle a été confirmé par le sondage aérologique mesuré à Payerne (non montré ici), témoignant d'une bonne prévision des ingrédients de l'instabilité ce jour-là.

2.2.2 La dynamique de basses couches

Le sondage prévisionnel présenté ci-dessus montre également les éléments dynamiques en présence, et est confirmé par le sondage aérologique mesuré à Payerne le 24 juillet vers midi (non montré ici). Les cisaillements verticaux du vent en basses couches entre 0-3 km et 0-1 km étaient particulièrement forts avec respectivement des valeurs de 80 à 110 km/h et 60 à 90 km/h sur la trajectoire orageuse.

Les vents du sondage prévisionnel de COSMO-1 CTRL (**Figure 8**) ainsi que l'hodographe correspondant présenté sur la **Figure 9**, valide pour un point de grille proche de La Chaux-de-Fonds à 09 UTC le 24.07, montrent une rotation du vent dans le sens horaire assez marquée entre le sol et 800 hPa environ. Les vents pivotent ainsi du SSW au sol à WSW à 800 hPa comme le montre la **Figure 10** présentant la force et direction du vent à 800 hPa prévues à 09 UTC le 24.07.

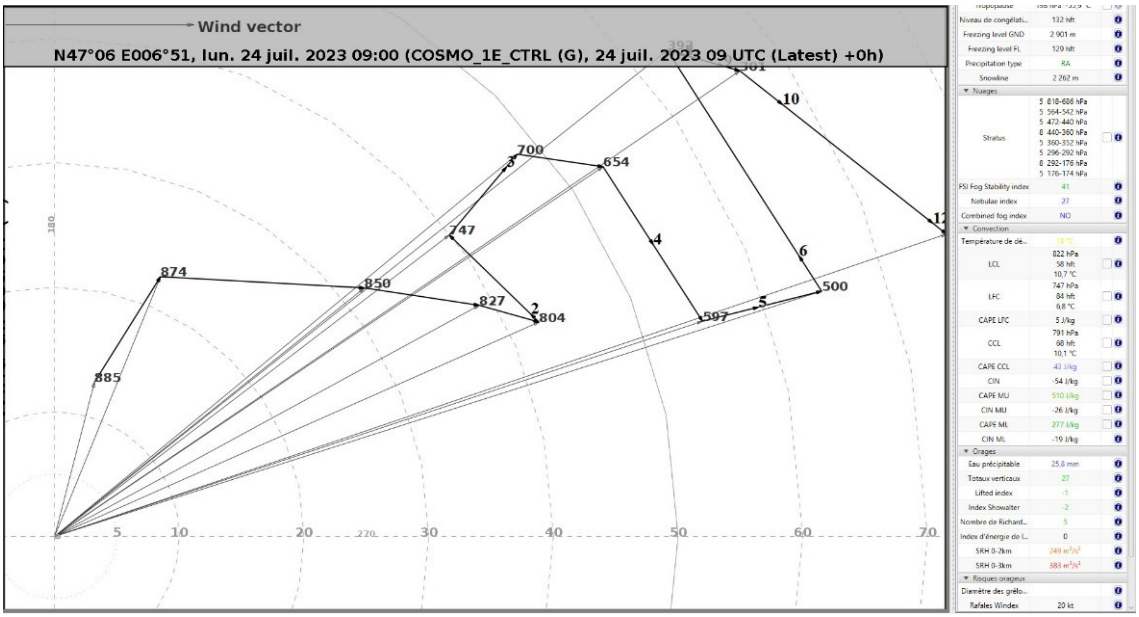

Figure 9 : profil vertical du vent sous forme d'hodographe à 09 UTC le 24.07.2023 prévu par COSMO-1 CTRL, run du 24.07.2023 à 09 UTC. Source : MétéoSuisse

Cette orientation modélisée de secteur SSW de vent au sol était bien prévue et confirmée par les mesures de l'aérodrome des Éplatures (voir mesures au sol dans la section 0).

Un tel cisaillement directionnel couplé à un cisaillement de vitesse important dans les basses couches est souvent décisif dans la production de rafales convectives violentes au sol. Le paramètre « storm relative helicity » (SRH) qui est une mesure du potentiel de rotation de son courant de tirage (inflow) relative à la direction de déplacement de l'orage, présentait des valeurs de 249 $m^2 s^{-2}$ pour la couche 0-2 km AGL (Above Ground Level, hauteur au-dessus du sol) et 383 $m^2 s^{-2}$ pour la couche 0-3 km AGL. Des valeurs élevées du SRH (0-1 km > 200 $m^2 s^{-2}$) sont connues pour favoriser un risque de tornade, même si ce critère n'est pas suffisant à lui-même pour en produire (voir Thompson et al.

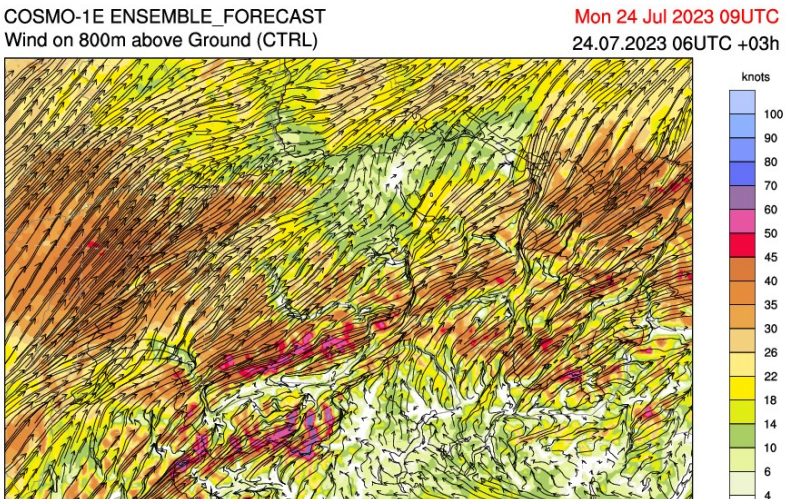

Figure 10 : force et direction du vent à 800 m de hauteur sol prévus à 09 UTC le 24.07.2023 par le COSMO-1 CTRL, run 06 UTC du 24.07.2023. Source : MétéoSuisse

2003 ; Kerr et al. 1996 ; Rasmussen 2003 ; Rasmussen and Blanchard, 1998 ; Johns et al. 1993 ; Thompson 1998 ; Weisman and Klemp, 1982).

2.2.3 Effets du relief du Jura et du vallon de La Chaux-de-Fonds sur l'intensité de l'orage

Bien qu'il soit difficile de déterminer à quel point la topographie a pu influencer la production des violentes rafales mesurées à La Chaux-de-Fonds, le relief du Jura est connu comme étant un couloir à orages. En plus de la convergence naturelle qui se produit par l'effet du réchauffement diurne en saison chaude le long de la crête, par vent de gradient d'W à SW, une convergence dynamique se produit. Cela favorise ainsi souvent le déclenchement d'orages dans les masses d'air instables et aide également à piloter leur déplacement. De plus, les vents de secteur sud dans les basses couches sont facilités le long de la topographie des crêtes du Jura comparée à celle des Préalpes, ce qui contribue à augmenter le cisaillement directionnel du vent.

La canalisation des vents dans certains vallons du Jura a déjà été jugée déterminante par le passé dans la production de tornades significatives (F2 à F4) associées à des cellules orageuses. Cela a notamment été le cas le 19 août 1890 entre le Bois d'Amont et Croy en passant par Le Brassus (tornade d'intensité F4), le 12 juin 1926 à La Chaux-de-Fonds (tornade d'intensité F2) comme l'atteste la photo de la **Figure 11** et le 26 août 1971 dans la vallée de Joux (tornade d'intensité F4) (voir Dessens and Snow, 1993 ; Gauthier, 1890 ; Piaget, 1976 ; Herzog and Golaz, 1926).

Figure 11 : dégâts en forêt après le passage de la tornade F2-F3 du 12.06.1926 à La Chaux-de-Fonds. Source : Bibliothèque de la Ville de La Chaux-de-Fonds.

Dans le cas du 24.07.2023, il est possible que la canalisation des vents dans le vallon de La Chaux-de-Fonds (dont une vue 3D est proposée sur la **Figure 12**) ait pu contribuer à renforcer les rafales de vents descendantes enregistrées au sol par effet Venturi mais il est difficile de quantifier cet effet. Il est plausible que le relief du Jura ait aidé à renforcer la cellule au vent du massif par soulèvement et ait contribué à l'écroulement de sa colonne de précipitations sous le vent, une fois que la cellule a pénétré dans le vallon de La Chaux-de-Fonds. Par ailleurs, le bâti et l'architecture urbaine particulière de la ville de la Chaux-de-Fonds ont pu jouer un rôle sur la canalisation des rafales de vents et des modifications de vitesses, mais cet aspect dépasse les prétentions purement météorologiques de ce rapport.

Figure 12 : le relief du Jura et du vallon de La Chaux-de-Fonds ont très vraisemblablement eu une influence sur l'intensité du phénomène orageux qui a frappé La Chaux-de-Fonds le 24.07.2023 et sur les autres phénomènes orageux dans la région par le passé, dont l'effet reste à quantifier. Source : Googlemaps.com

2.2.4 Effets de l'air sec du panache ibérique sur l'intensité de l'orage en amont

La structure orageuse a évolué selon plusieurs modes convectifs le long de son parcours s'étendant du nord du Massif Central jusqu'au Jura suisse. Une première phase intense s'est produite lorsque la cellule a évolué en orage arqué entre la vallée de la Saône et Besançon. Selon les données de modèles et observations recueillies, il semblerait que la masse d'air dans cette région était un peu plus instable qu'ailleurs et que cela a contribué à l'intensification de l'orage dans cet environnement très cisaillé. Durant cette phase arquée, l'orage a produit de violentes bourrasques de vents linéaires de type microrafales. Ces dernières semblent avoir été renforcées par une intrusion d'air sec dans les couches moyennes liée à la remontée d'air continental tropical depuis la péninsule Ibérique. Les prévisions du modèle européen présentées sur la **Figure 13** montrent bien cette intrusion d'air chaud et sec en provenance de la péninsule ibérique (*Spanish Plume*).

Le renforcement du courant descendant par évaporation dans cet air sec semble également être un des facteurs déterminants de la virulence du courant-jet entrant arrière (Rear-Inflow Jet)[1] de cet orage en arc lors de son rapide déplacement vers l'est.

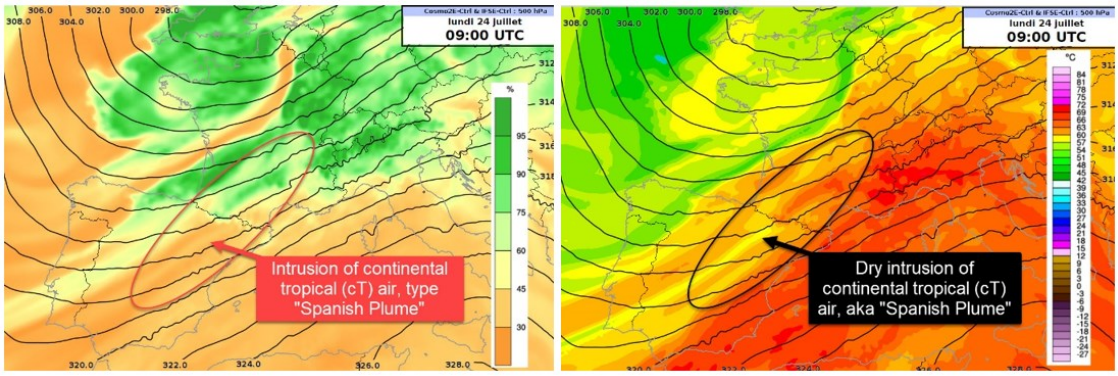

Figure 13 : humidité relative (à gauche) et Theta-E (à droite) à 700 hPa prévues à 09 UTC le 24.07.2023 par le modèle IFS. L'intrusion sèche de la péninsule ibérique est entourée sur chaque carte. Source : ECMWF-IFS via NinJo

Les configurations à large et méso-échelles décrites ci-dessus étaient donc plus que suffisantes pour générer et entretenir une convection organisée. Celles-ci ont favorisé la formation de structures orageuses de types arqué et supercellulaire au fil de la matinée et de l'après-midi sur une bonne partie du quart centre E/NE de la France et sur la Suisse.

Toutefois, les valeurs d'instabilité limitées (400-1200 J/kg de MUCAPE) prévues par les modèles numériques ainsi que les structures orageuses simulées fluctuaient passablement d'un run à l'autre. De plus, elles montraient une dispersion et variabilité importante dans les ensembles. Cette variabilité engendrait passablement d'incertitudes concernant l'étendue, la chronologie et la virulence des évènements convectifs possibles, ce qui a particulièrement compliqué la prévision. Ce point sera repris dans la **section 6** relative à la performance des outils et modèles.

[1] Pour information, un courant jet entrant arrière est une accélération des vents dans les couches moyennes à l'arrière des orages arqués suite à l'interaction entre le courant ascendant entrant avant et le courant descendant entrant arrière coexistant au sein de ces structures orageuses. Si les conditions sont favorables, les courants jet entrant arrière des cellules orageuses peuvent entraîner une partie de cette énergie vers le bas jusqu'au sol et produire des rafales supérieures à 150 km/h (voir Fujita and Wakimoto, 1981).

3 Description de l'évolution orageuse à l'aide de données radar, satellite, foudre et des mesures des stations au sol

Ce chapitre décrit l'évolution de la structure orageuse grâce à un ensemble de données radar (réflectivité, vitesses radiales), images satellites et données au sol. Il apporte les premiers éléments permettant de mettre en avant l'hypothèse de la nature hybride de l'évènement, de type microrafale et tornade.

3.1 La structure orageuse vue par radar et satellite

Pour commencer, il est important de souligner que le radar météorologique de la Dôle ne bénéficie pas d'une visibilité optimale en direction de la région du Doubs et de La Chaux-de-Fonds. En effet, sa proximité physique immédiate à un radar aéronautique engendre un blocage des élévations de balayage les plus basses en direction du NE. Par conséquent, un cône d'ombre important existe dans cette direction comme le montre la **Figure 14**. L'utilisation de la mosaïque composite des 5 radars du réseau MétéoSuisse (voir **Figure 15**) permet de s'affranchir partiellement de cette limitation de visibilité du radar de La Dôle, Néanmoins, il est souvent plus compliqué ou impossible d'utiliser ce composite lorsqu'on souhaite analyser les vitesses radiales et effectuer des vérifications par angle de balayage. Les analyses ci-après se sont donc basées essentiellement sur le radar MétéoSuisse de la Plaine Morte situé en Valais, qui possède une meilleure visibilité sur le secteur d'intérêt ici.

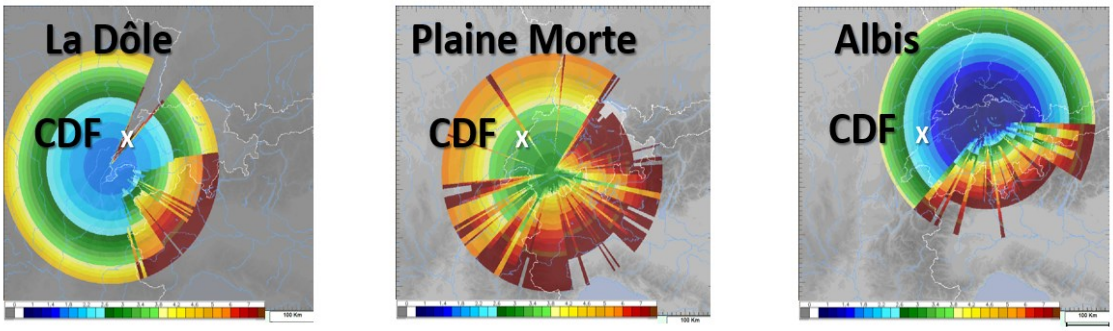

Figure 14 : rayon de détection de différentes élévations (en km) des radars de la Dôle (à gauche), la Plaine Morte (au milieu) et l'Albis (à droite). L'emplacement de La Chaux-de-Fonds est indiqué par une croix blanche. Source : MétéoSuisse, mis en forme par Marco Stoll, MétéoSuisse

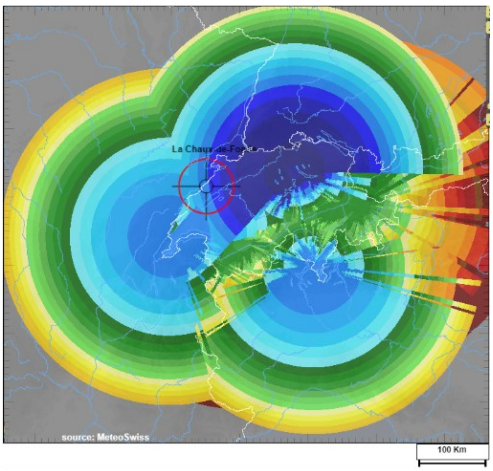

Figure 15 : composite de l'altitude minimale de visibilité théorique (km) de l'ensemble des 5 radars du réseau MétéoSuisse. Source : MétéoSuisse

Dans ce chapitre, l'analyse s'appuiera sur deux types de données radars :

- Les réflectivités, qui permettent de mesurer l'intensité des précipitations et d'identifier certaines signatures pertinentes liées aux structures orageuses telles que les échos en crochet (*hook-echoes*) et les échos de réflectivité arquée (*bow-echoes*), connus pour favoriser ou précéder des processus responsables de phénomènes venteux violents tels que les tornades et les microrafales
- Les vitesses radiales, qui permettent de détecter les hydrométéores et autres poussières en suspension qui s'éloignent ou s'approchent du radar, et ainsi de détecter les signatures de convergence, de divergence ou de cisaillement rotationnel, pouvant aider dans l'identification de structures et de phénomènes orageux tels que les microrafales, les courants de flanc arrière et les rotations à la méso-échelle. Dans une minorité des cas, il est également possible de détecter des *tornado vortex signatures* (TVS) si les caractéristiques du radar, sa longueur d'onde, la stratégie de balayage et son emplacement le permettent (distance et élévation) par rapport au phénomène tornadique lui-même (voir Brown and Lemon, 1976 ; Brown et al. 1978 ; Brown and Wood, 2012).

Certaines de ces structures orageuses sont mises en évidence dans le cas du 24 juillet 2023 et sont décrites à travers les paragraphes qui suivent.

3.1.1 Phase arquée de l'orage

La cellule orageuse qui a frappé La Chaux-de-Fonds le 24 juillet 2023 entre 09:20 et 09:35 UTC se forme vers 06 UTC (8h locales) dans la région de Moulins dans l'Allier et présente alors une réflectivité linéaire. C'est en abordant la vallée de la Saône que cette ligne de grain a évolué progressivement vers une structure d'orage en arc à partir de 07:35 UTC. L'orage a gardé cette structure arquée pendant une bonne heure jusque vers 08:20 UTC au sud de Besançon, comme l'atteste l'image de réflectivité de gauche sur la **Figure 16**.

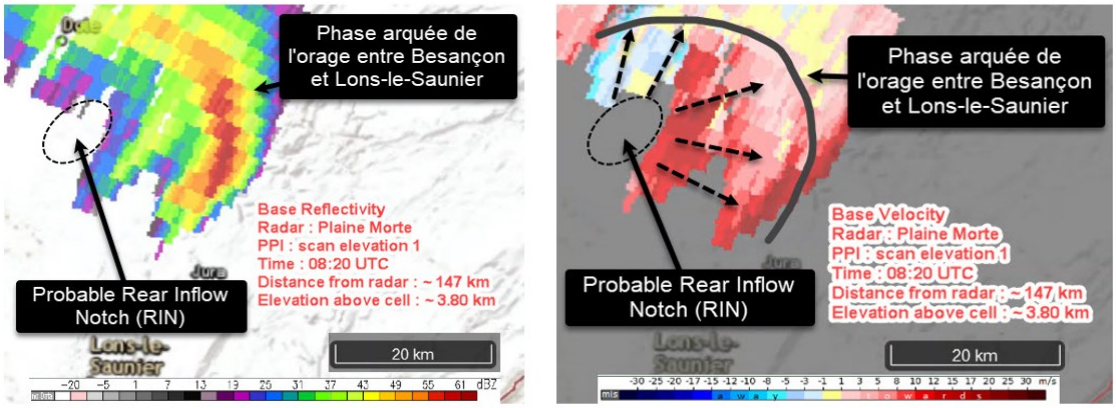

Figure 16 : à gauche, réflectivité basse (élévation 1) avec probable courant de flanc arrière (*Rear Inflow Notch*, RIN). A droite, vents radiaux bas avec une forte composante en approche du radar (en rouge foncé) et une partie s'éloignant du radar (en bleu). Source : Radar de la Plaine Morte, MétéoSuisse

Lors de cette phase arquée, un fort signal de vents se dirigeant vers le radar de la Plaine Morte est visible sur les angles de balayage les plus bas directement à l'arrière de sa partie arquée (**Figure 16**). L'angle de balayage le plus bas à cette distance se situant entre 3.5 et 4 km d'altitude, ce fort signal de rapprochement est probablement lié à la présence d'un courant-jet entrant arrière, structure communément associée au flux arrière-avant des orages en arc et typiquement située dans les couches moyennes de l'atmosphère (voir Weisman 1992 ; Bluestein and Gaddy 2001 ; Grim et al. 2009). Cette hypothèse est renforcée par la présence simultanée d'une sorte d'échancrure dépourvue d'écho radar (Rear-Inflow Notch, RIN) à l'arrière des précipitations de l'orage arqué lors de son déplacement rapide dans cette région.

3.1.2 Phase d'affaiblissement de l'orage

L'orage s'est ensuite affaibli tout en épousant une configuration linéaire plus traditionnelle durant les 30 minutes suivantes jusque vers 09:05 UTC au nord de Pontarlier, ce que montrent les images radar vers 08:55 UTC de la **Figure 17**. Sur ces images, on repère une zone dépourvue d'échos de réflectivité (RIN) accompagnant les restes du courant-jet entrant arrière qui était actif lors de la phase arquée intense de l'orage.

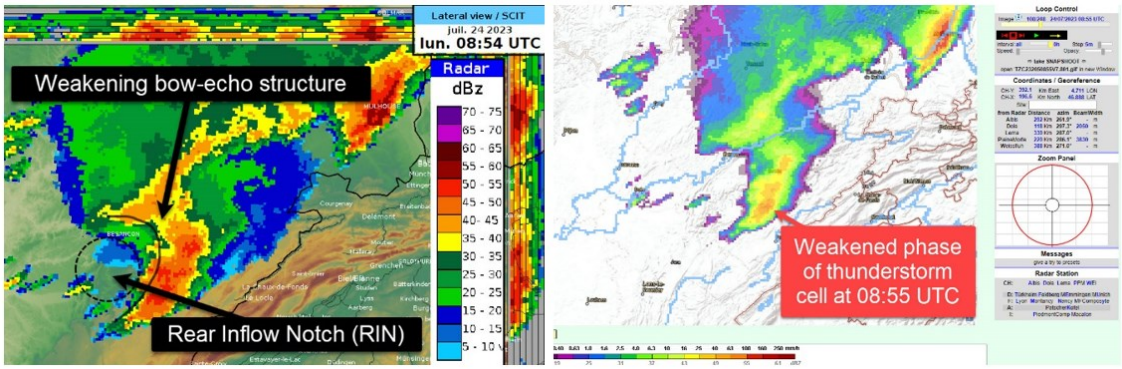

Figure 17 : réflectivité radar composite max de la phase affaiblie de l'orage arqué à 08h54 UTC (à gauche) et radar precipitation product (TZC) à 08h55 UTC (à droite). Source : MétéoSuisse

3.1.3 Phase supercellulaire de l'orage

Ensuite, durant les 20 minutes suivantes, soit entre 09:05 et 09:25 UTC, la partie sud de la ligne orageuse s'est renforcée rapidement et de façon explosive en abordant la frontière suisse en amont du vallon de La Chaux-de-Fonds. Durant cette phase, on repère sur la **Figure 18** une zone dépourvue d'échos radar à l'arrière de l'orage (RIN) indicative d'un courant-jet entrant arrière montrant l'intrusion d'air sec depuis les couches moyennes.

Durant cette phase critique, la partie sud de cette ligne a progressivement évolué vers une structure supercellulaire à haute précipitation (*high-precipitation supercell*, abrégé HP) selon la réflectivité mesurée à 09:24 UTC à disposition sur la **Figure 18**. L'image satellite prise à 09:15 UTC confirme aussi l'intensification de la cellule par la rapide baisse des températures du sommet du nuage d'orage (température de brillance de la couche IR 10.8), passant de -58 °C à -61 °C. Sur la même image et simultanément à cette baisse de température, on observe un sommet pénétrant (*overshooting top),* qui témoigne de l'extension de la supercellule encore plus haut, en lien avec des courants ascendants plus forts au sein de l'orage durant cette phase critique. Cette intensification et ce refroidissement rapide des températures de brillance sont liés à la phase supercellulaire de l'orage lors de sa traversée de La Chaux-de-Fonds.

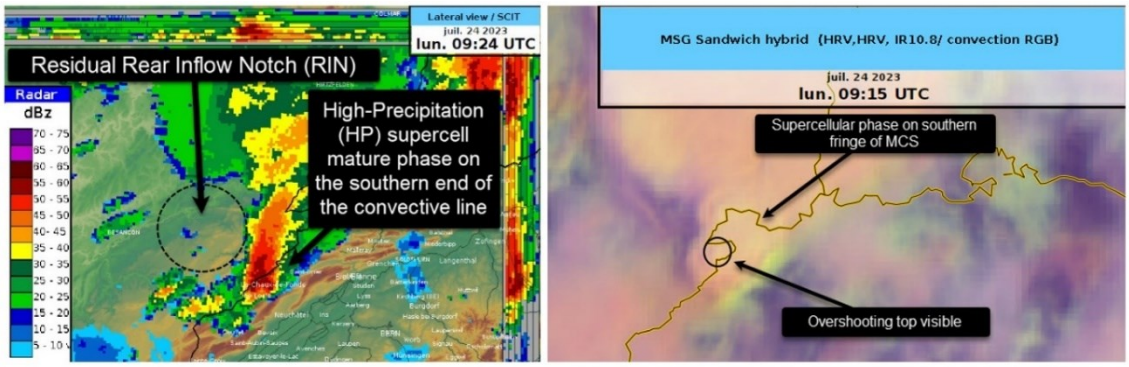

Figure 18 : réflectivité radar composite max de la phase de renforcement rapide de l'orage en supercellule (HP) à 09 :24 UTC (à gauche) et image satellite montrant la température du sommet de la structure orageuse à 09 :15 UTC (à droite) lors de l'arrivée sur La Chaux-de-Fonds. Source : MétéoSuisse

Cette transition rapide vers une structure supercellulaire se remarque bien vers 09:25 UTC sur les images de réflectivité et de vitesses radiales issues de l'angle de balayage le plus bas du radar de la Plaine Morte présentées dans la **Figure 19**. A ce moment-là, lorsque l'orage débute sa traversée de La Chaux-de-Fonds depuis l'ouest, un dipôle de vitesses radiales identifiant clairement la rotation de la supercellule est bien visible sur plusieurs élévations de balayage du radar de la Plaine Morte, entre 3 et 6 km d'altitude, y inclus sur l'élévation la plus basse interceptant la cellule à une altitude d'environ 3.1 km (**Figure 19** à droite). Certaines signatures étaient visibles jusqu'au sommet de l'orage estimé entre 9 et 10 km d'altitude (non montré).

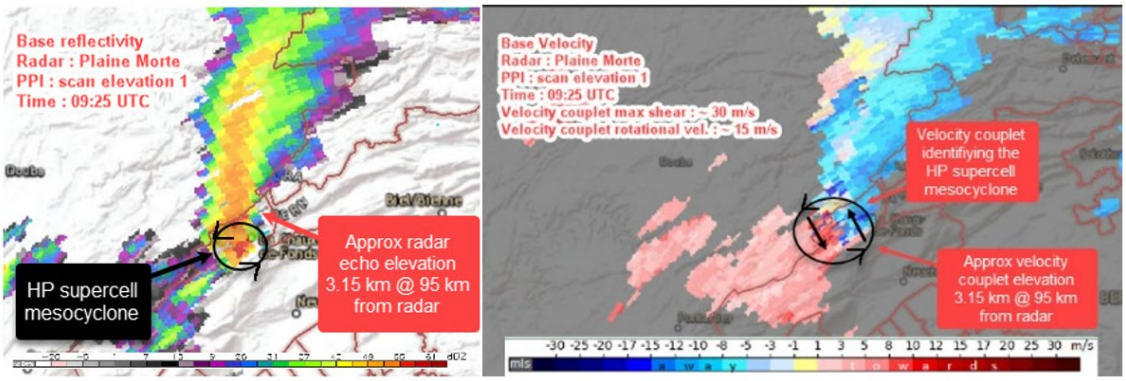

Figure 19 : à gauche, réflectivité basse avec évolution de la structure d'écho en supercellule HP (sud de la ligne). A droite, vents radiaux bas avec la présence d'un couplet de vitesse composé d'une forte composante en approche du radar (en rouge foncé) jouxtant une partie s'éloignant (en bleu), témoignant de la présence d'une circulation mésocyclonique. Source : Radar de la Plaine Morte, MétéoSuisse

Il n'a pas été possible de se prononcer sur le comportement des vents radiaux en dessous de 3 km d'altitude, l'angle de balayage le plus bas du radar de la Plaine Morte interceptant la verticale de La Chaux-de-Fonds précisément à cette altitude.

3.1.4 Phase d'affaissement et d'écroulement de la cellule

A partir de 09:30 UTC, la cellule a montré des signes d'affaissement progressif et d'écroulement de sa colonne de précipitations, avec une structure évoluant à nouveau vers une configuration davantage arquée. Cette évolution est liée à la rapide expansion du courant de densité proche du sol rattaché au courant descendant du flanc arrière de l'orage supercellulaire. La **Figure 20** montre cette évolution progressive de la supercellule HP vers une structure arquée, parallèlement à l'écroulement de sa colonne de précipitation au sein du courant descendant du flanc arrière.

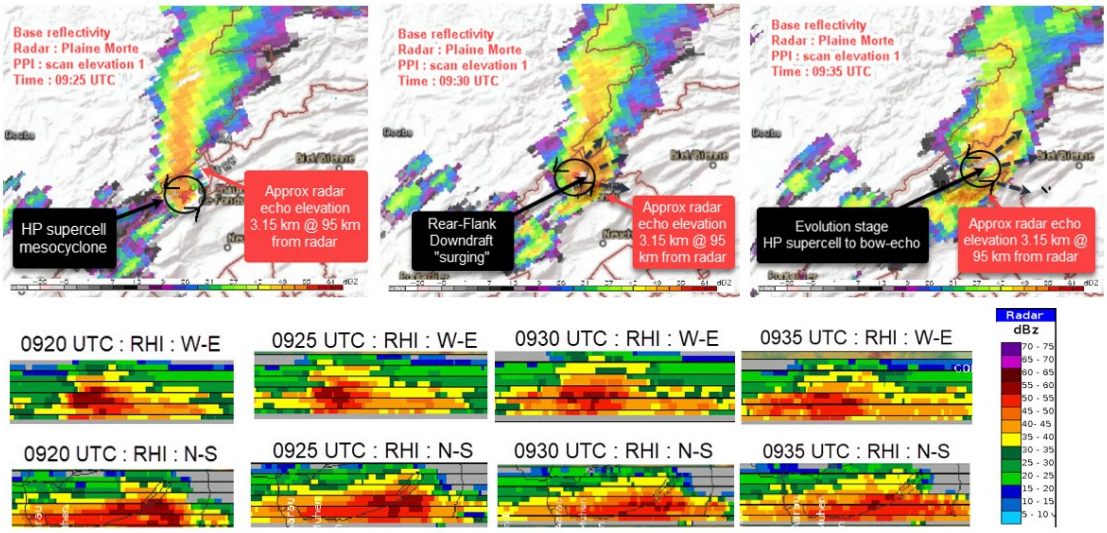

Figure 20 : réflectivité basse (scan 1, angle d'élévation le plus bas) de l'orage au passage de La Chaux-de-Fonds du radar de la Plaine Morte à 09:25 UTC (à gauche en haut), à 09:30 UTC (au centre en haut) et à 09:35 UTC (à droite en haut). En dessous, la structure verticale (RHI) de l'orage (réflectivité composite max) sur un axe ouest-est et nord-sud à 09:20 UTC, 09:25 UTC, à 09:30 UTC et à 09:35 UTC respectivement de gauche à droite (l'espacement vertical des barres noires horizontales est de 2 km). Source : MétéoSuisse

Selon les données radar analysées ici, il est probable que le fort courant descendant du flanc arrière de la supercellule ait contribué à propager une partie de l'énergie cinétique du courant-jet entrant arrière jusqu'au sol. Cette hypothèse est présentée avec l'image radar annotée de la **Figure 21**.

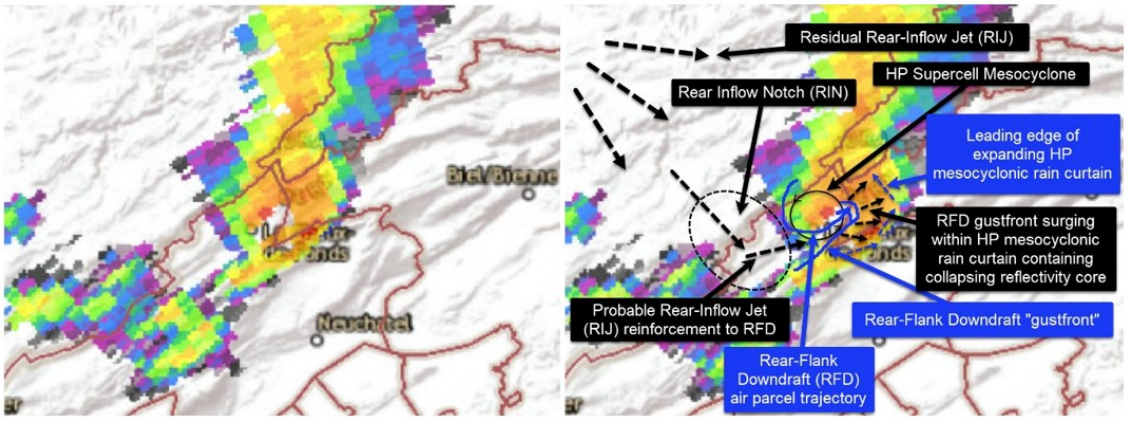

Figure 21 : réflectivité basse (angle d'élévation radar le plus bas) de l'orage issue du radar de la Plaine Morte à 09:30 UTC (à gauche), annotée des structures et processus supposés être à l'origine des violentes rafales de vents ayant dévasté La Chaux-de-Fonds (à droite). Source : MétéoSuisse

3.1.5 Présence supplémentaire probable d'une circulation tornadique de micro-échelle

Les vitesses radiales issues des données radars analysées précédemment montrent clairement une rotation à l'échelle de la cellule orageuse. Certains des dégâts observés au sol le long de la franche nord et au sein de la ville de La Chaux-de-Fonds soutiennent également la thèse de renforcement des rafales au sol par la présence d'une circulation tornadique comme expliqué en détail dans la section 4.1.1.

L'hypothèse la plus probable est celle d'un évènement de nature hybride comme illustré dans la **Figure 22**.

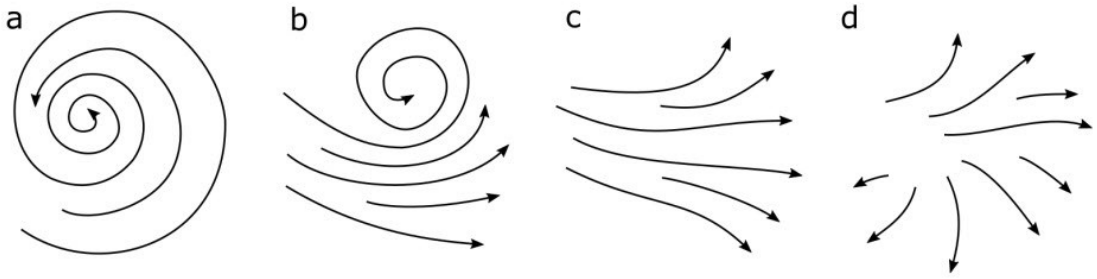

Figure 3-2. Near-surface wind patterns of a) a tornado, b) hybrid wind event, c) a translating downburst, and d) a quasi-stationary downburst.

Figure 22 : schéma conceptuel montrant les flux de vents proches du sol associés et correspondant aux différents types de phénomènes venteux convectifs, soit a) une tornade, b) un évènement hybride (tornade en haut/microrafale en bas), c) une macro/microrafale mobile, d) une macro/microrafale quasi-stationnaire. Figure extraite de "The International Fujita Scale (IFS) for tornado and wind damage assessments", Groenmeijer et al. 2023.

Néanmoins, confirmer la présence d'une circulation tornadique à l'aide de signatures de vitesse radiale des radars est difficile étant donné que la plupart des radars de notre réseau se situent au-dessus de 1000 m d'altitude et par conséquent ne sondent l'atmosphère qu'au-dessus de cette altitude. De plus, le radar de la Plaine Morte sonde uniquement au-dessus de 3 km d'altitude à la verticale de La Chaux-de-Fonds. Par conséquent, il devient nettement plus compliqué de déceler des indices de tornade sur les images de vitesses radiales de ce radar.

Malgré ces limitations et dans certaines circonstances, il est néanmoins possible de repérer des signatures tornadiques, ou du moins, de fortes rotations à l'échelle de la cellule orageuse elle-même quelques kilomètres au-dessus du sol. Cette rotation signe potentiellement la présence d'un « mésocyclone » de basses couches au sein de la cellule, ou encore d'une « circulation mésocyclonique ».

Les données radar à 09:30 UTC présentées dans la **Figure 23** permettent de déceler, durant le stade de transition supercellulaire à un orage arqué, une circulation de plus petite échelle au sein de la circulation mésocyclonique, c'est-à-dire à une échelle plus petite que l'orage lui-même.

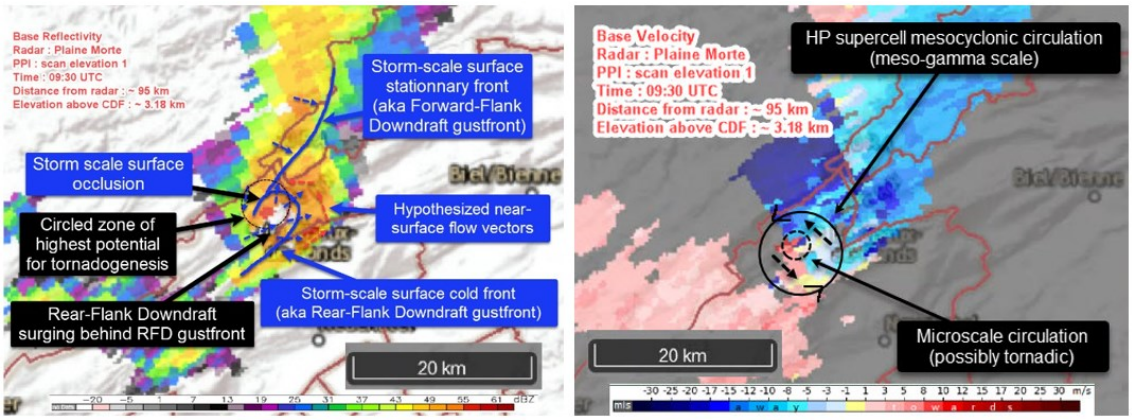

Figure 23 : à gauche, réflectivité basse annotée des flèches des zones de convergence au sol à l'échelle de l'orage ainsi que des flux associés à ces zones proches du sol. A droite, vents radiaux bas annotés des flèches décrivant la circulation mésocyclonique et une circulation à la micro-échelle au sein du mésocyclone identifiant une possible circulation tornadique. Source : Radar de la Plaine Morte, MétéoSuisse

Une cohérence temporelle de cette signature à la micro-échelle semble visible sur les deux élévations les plus basses du radar pendant environ 10 à 15 minutes. Cette région est typiquement celle dans laquelle la probabilité de genèse de tornade est la plus élevée (voir Brown et al. 1978 ; Brown and Wood 2012).

3.1.6 Phase finale d'affaiblissement de la ligne orageuse

À partir de 09:40 UTC, les températures de brillance associées à la cellule orageuse augmentent à nouveau (non montré), reflétant l'affaiblissement de l'orage consécutif à l'affaissement de sa colonne de précipitations. Sur les images radar comme montré sur la **Figure 24**, à partir de 10:00 UTC, la structure orageuse se déplace à nouveau sous une forme linéaire sans intensification significative au cours des 40 minutes suivantes. À ce stade, la ligne orageuse n'est plus source de phénomènes violents.

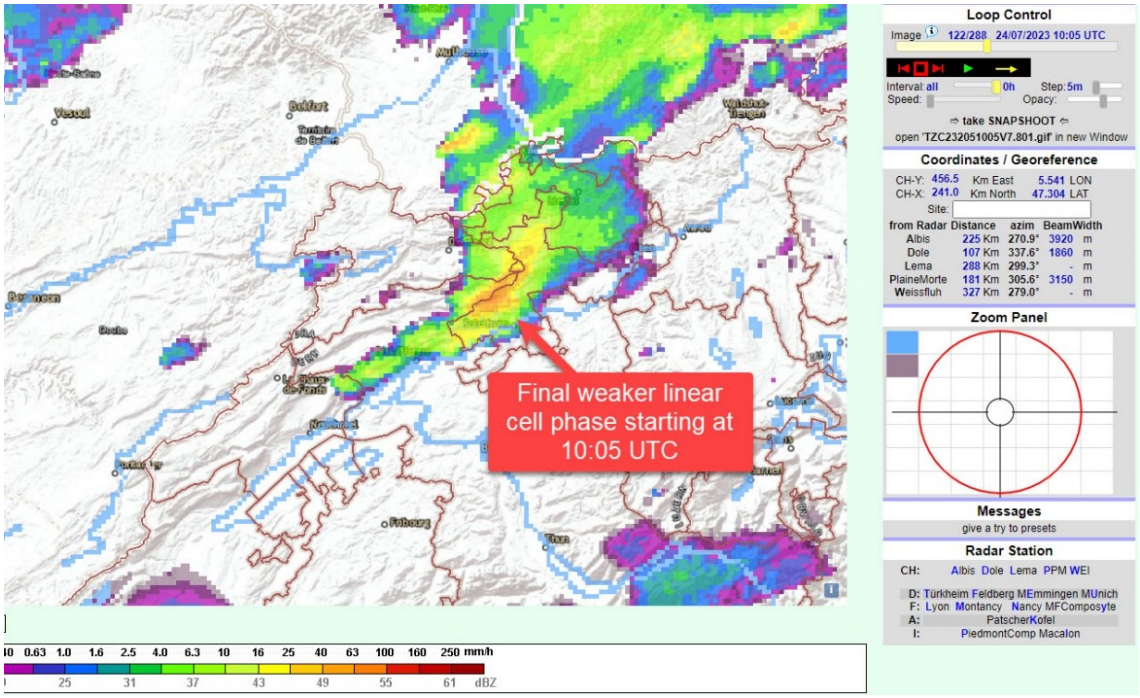

Figure 24 : réflectivité mesurée à 10 :05 UTC, montrant la nouvelle phase affaiblie de l'orage vers Soleure après la déstructuration de sa phase arquée en aval de La Chaux-de-Fonds. Source : MétéoSuisse

3.1.7 Signatures radar de présence de grêle

Fait remarquable sur cet orage, les estimations de grêle par radar sont faibles juste en amont de La Chaux-de-Fonds, malgré sa phase d'intensification rapide, comme le montre la **Figure 25**. Les estimations de grêle causée par l'orage sont plus manifestes pendant sa phase d'écho arqué jusque vers Besançon, puis se sont considérablement atténuées et ont presque entièrement disparu entre Besançon et la région du Doubs. Malgré cette phase de réflectivité affaiblie, l'orage était encore passablement intense comme démontré par l'intensification de sa rotation.

Les signatures de grêle se sont toutefois légèrement renforcées au passage de La Chaux-de-Fonds, conséquence de sa phase d'intensification supercellulaire.

Figure 25 : signaux de probabilité de grêle (Probability of Hail – POH)) associés à la cellule orageuse le long de sa trajectoire (à gauche) and la taille maximale estimée des grêlons (Maximum Expected Severe Hail Size (MESHS)) (à droite).

3.2 Données foudre

La carte de densité d'impacts de foudre au sol associés à l'orage le long de sa trajectoire présentée sur la **Figure 26** fait ressortir deux montées en puissance successives qui correspondent à deux « lightning jumps » : le premier autour de Chalon-sur-Saône vers 07:30 UTC jusque vers 08:30 UTC lorsque l'orage évoluait dans sa phase arquée, puis un second pic à partir de 09:15 UTC lorsque l'orage abordait le val de Morteau en France et s'apprêtait à poursuivre son chemin en direction de La Chaux-de-Fonds en phase supercellulaire. En revanche, entre 08:30 UTC et 09:15 UTC, durant sa phase affaiblie en approche du Doubs, l'orage a vu une baisse drastique de son activité électrique.

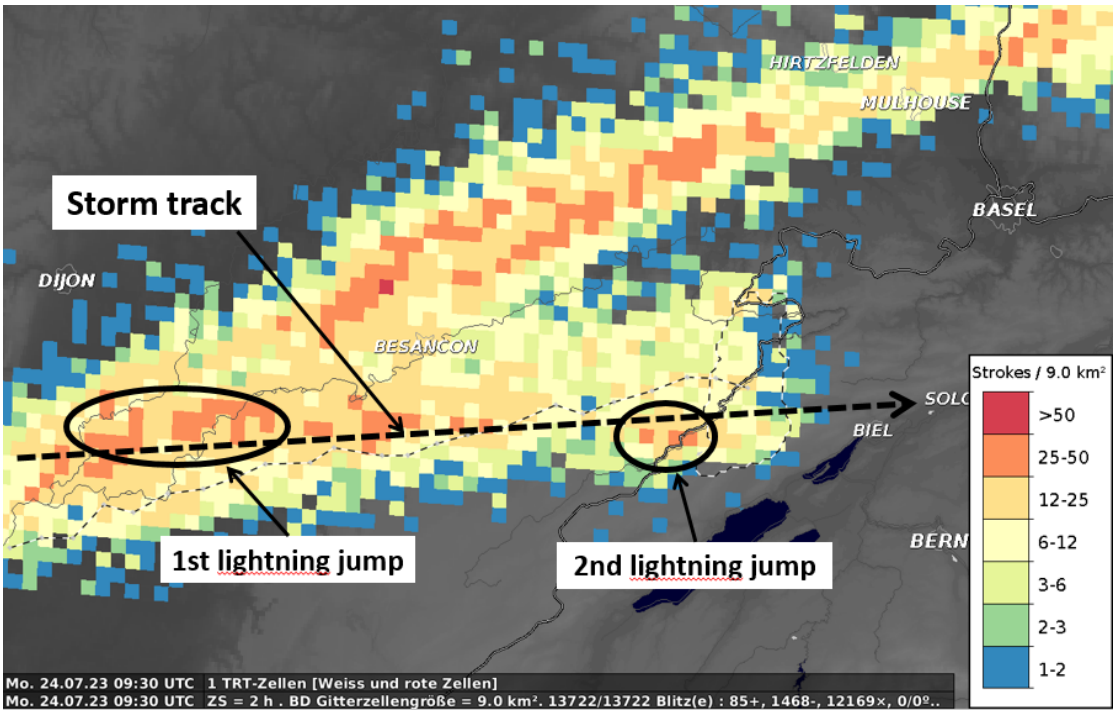

Figure 26 : répartition de l'activité électrique nuage-sol le long de la trajectoire orageuse le 24.07.2023, mettant en évidence 2 lightning jumps. Source : Météorage, MétéoSuisse

3.3 Données au sol

En complément des données radars, satellites et foudre analysées jusqu'ici, les mesures des stations au sol sont des indices précieux pour déterminer la nature précise du phénomène qui a impacté la région puisque la zone la plus active de l'orage est passée sur plusieurs stations de mesures.

D'abord, en fin de nuit du 23 au 24 juillet déjà, une ligne orageuse avec des rafales de l'ordre de 70 à 80 km/h a balayé la Suisse. Ces valeurs de vent, remarquablement fortes étant donné l'heure précoce, constituaient un premier indice tangible de l'environnement dynamique en place, laissant présager d'une journée agitée avec l'apport d'énergie supplémentaire de l'évolution diurne.

Ce renforcement précoce du vent, particulièrement sensible sur le Jura, signe l'établissement d'un puissant couloir de vents forts à l'altitude des crêtes du Jura ou jet de basses couches. Ce jet de basses couches précurseur est bien visible dans les mesures de vent à La Brévine, La Chaux-de-Fonds et Chasseral comme le montrent les courbes de la **Figure 27** vers 04 UTC.

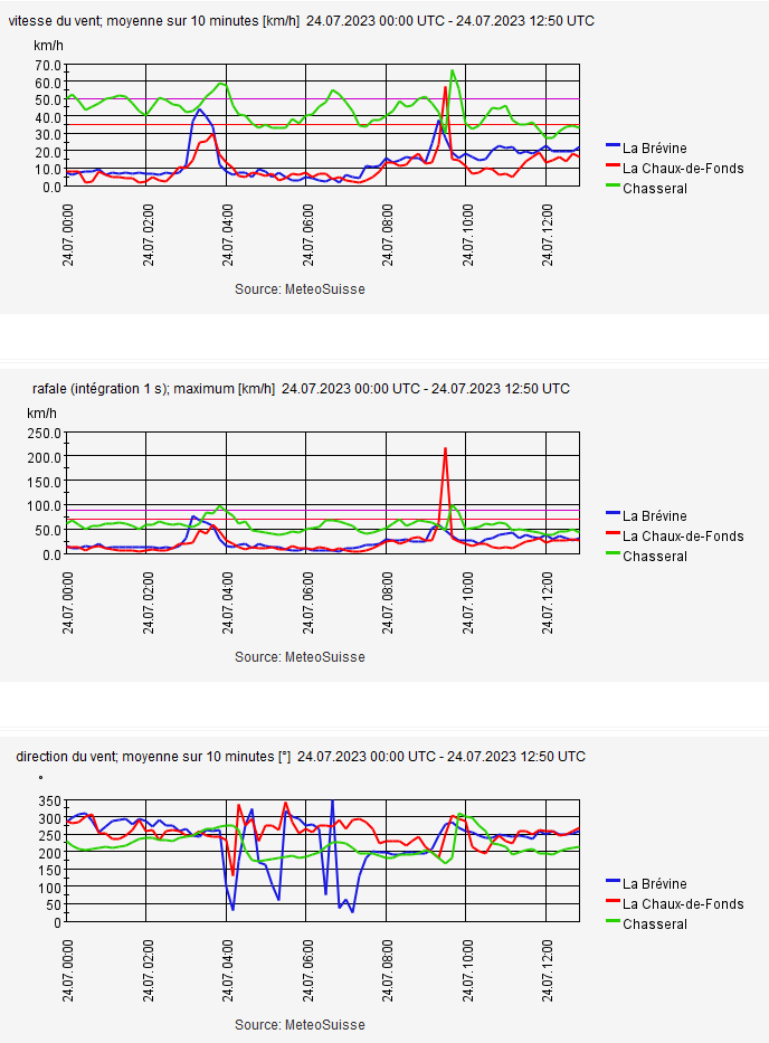

Figure 27 : vitesse du vent moyen (en haut) rafales maximales sur 1 s (au milieu) et direction du vent (en bas) aux stations de la Brévine (courbe bleue), La Chaux-de-Fonds (courbe rouge) et Chasseral (courbe verte), le 24 juillet 2023 de 00 à 12 UTC. Source : SwissMetNet

A l'échelle régionale sur le Jura, à l'approche de la cellule entre 08 et 09 UTC, les vents de SW se renforcent et pivotent juste avant l'arrivée de la cellule temporairement au S, voire légèrement au SE (voir mesures à Chasseral à 09:30 UTC).

L'évolution des vents mesurés au sol sur la région combinée à la position de la cellule présentée dans la **Figure 28** permet de localiser précisément les rotations par rapport à l'orage. A 09:10 UTC, alors que la cellule n'a pas encore franchi la frontière, les vents sont orientés au sud-ouest aux 3 stations mentionnées précédemment. A 09:20 UTC, moment où l'orage passe sur La Chaux-de-Fonds, le vent accuse un pivotement au sud aux Éplatures ainsi qu'à Chasseral, signe qu'une rotation est à l'œuvre dans la bordure sud de la cellule orageuse. A 09:30 UTC, l'orage a tout juste passé La Chaux-de-Fonds et sa bordure sud aborde le Chasseral où le vent moyen semble même s'orienter légèrement sud-est tandis qu'il bascule à l'ouest à l'arrière voire déjà au nord-est à La Brévine. A 09:40 UTC, les vents à la Brévine et aux Éplatures ont basculé au nord-ouest. Au même moment, le vent de sud s'est renforcé à Chasseral, sans doute toujours dans la bordure sud de la cellule. A 09:50 UTC, la cellule transite sur Delémont et à l'arrière les vents sont orientés au nord-ouest, y compris à Chasseral.

Les mesures de vitesse et direction du vent relevé en 3 stations distinctes, mais proches, de l'aéro-

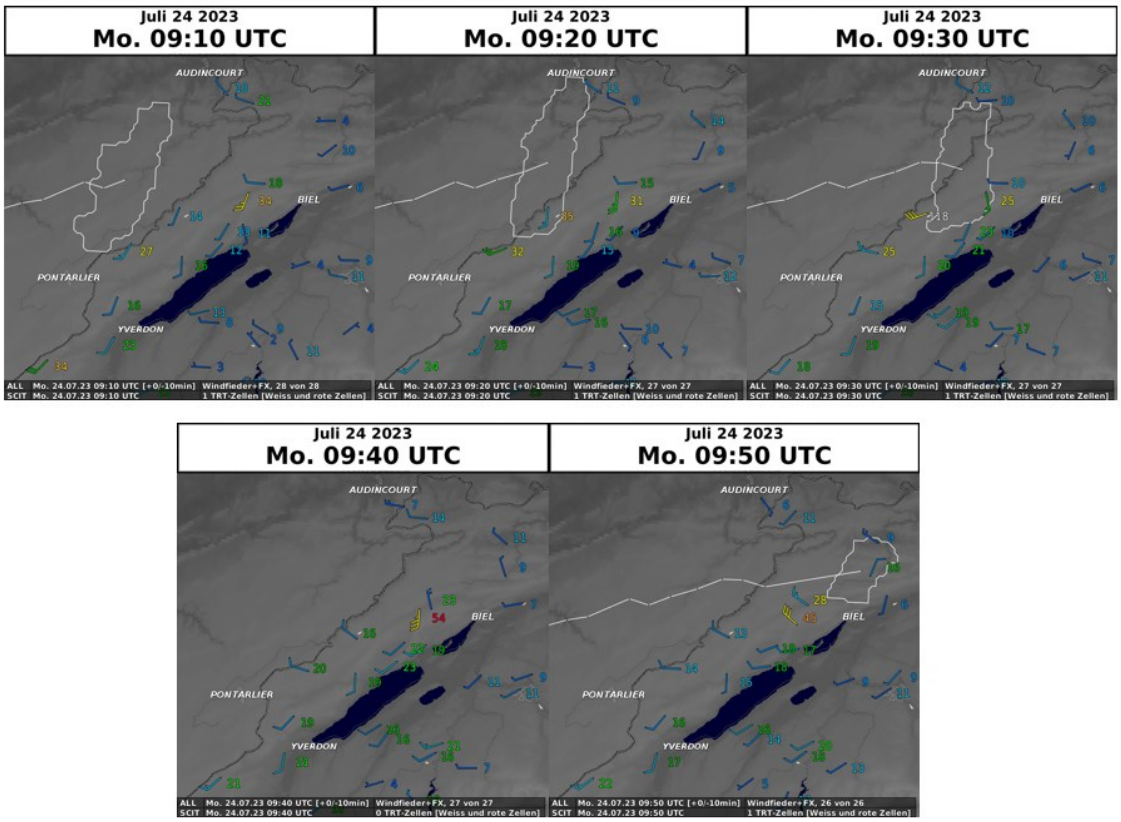

Figure 28 : contour et trajectoire récente de la cellule identifiée par l'algorithme (en blanc) superposés aux mesures ponctuelles de la force et direction du vent moyen (barbules) et rafale maximale sur 1 s (chiffres) en surface de 09:10 à 09:50 UTC le 24.07.2023. Source : SCIT-TRT et SwissMetNet visualisés avec NinJo. A noter que le contour de la cellule tel qu'identifié par l'algorithme n'est pas apparent à 09 :40 car le niveau de sévérité est inférieur aux seuils de visualisation.

drome des Éplatures confortent cette rotation et mettent en évidence son caractère soudain.

Ces indices mettent en évidence une rotation à l'échelle de la vallée au fil de la progression de la cellule et convergent avec l'hypothèse faite précédemment d'une rotation dans la partie sud de cette supercellule. Cette rotation des vents à l'échelle de la structure orageuse (rotation « mésocyclonique ») est confirmée par les images des dégâts présentées dans la section suivante.

4 Caractérisation de l'événement à travers les dégâts observés et les mesures de vents

Ce chapitre, à travers une série de photos aériennes et d'observations sur le terrain qui témoignent de dégâts à la fois « convergents » et « divergents », confirme la nature hybride (micro-rafale et tornade) de l'événement.

4.1 Analyse des dégâts observés

Le passage de l'orage a provoqué des dégâts considérables, parfois extrêmement localisés. Dans ce cas, les phénomènes en cause passent entre les mailles des instruments de mesure, même des radars dont la résolution est limitée de par leur éloignement. De nombreux dégâts ont été observés côté français comme le montre la carte du tracé probable de la macrorafale réalisée par Keraunos sur la **Figure 29** ci-dessous. Les paragraphes qui suivent s'intéressent à la section entre Montlebon et La Chaux-de-Fonds.

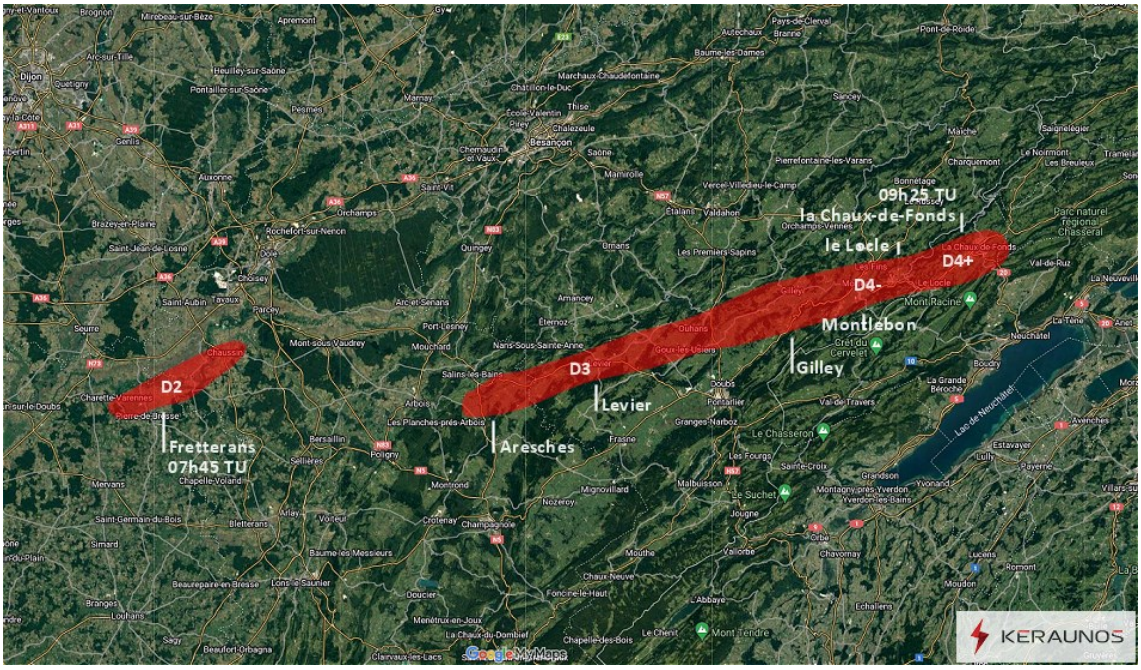

Figure 29 : estimation de la trajectoire parcourue par les macrorafales du 24 juillet 2023 entre 07:45 UTC (Fretterans) et 09:25 UTC (La Chaux-de-Fonds). Les phénomènes d'accentuation extrême ne représentent parfois que quelques dizaines de mètres de largeur. Source : Keraunos.org

4.1.1 Photos

Le long du flanc nord de la ville, des tracés de dégâts souvent convergents sont apparents sur la végétation, en adéquation avec le passage d'une tornade. Au contraire, le long de la bordure sud de

la ville, des dégâts de nature davantage rectiligne et divergents sont visibles, plus cohérents avec ceux rencontrés suite au passage d'une microrafale.

Cette différentiation a pu être mise en évidence grâce, d'une part, à une analyse des dégâts sur le terrain effectuée le jour suivant l'évènement par Lionel Peyraud et à la réception de nombreuses photos des dégâts reçus de multiples sources, et d'autre part, grâce à des orthophotos aériennes effectuées par le département du développement territorial et de l'environnement du canton de Neuchâtel. Ces photos aériennes, dont un aperçu est fourni dans la **Figure 30**, permettent de mieux caractériser la nature des dégâts, notamment en observant la direction de la couchée des arbres dans les secteurs endommagés.

Nous nous concentrons dans ce rapport sur certaines de ces zones représentatives des conditions de vent rencontrées au passage de l'orage.

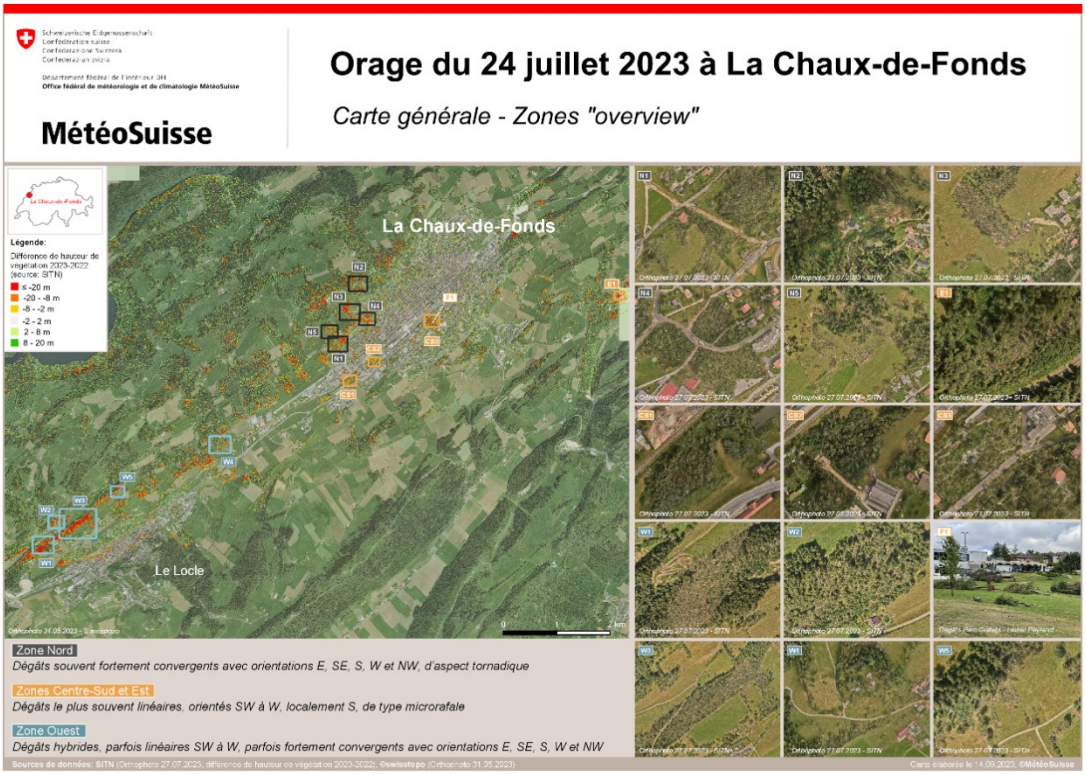

Figure 30 : à gauche, aperçu du Locle et de La Chaux-de-Fonds avec les différentes zones de dégâts identifiées par des rectangles de couleurs, et à droite, zooms correspondants. Source : SITN, SwissTopo mis en forme avec QGIS par Pamela Probst (MétéoSuisse)

4.1.2 Flanc nord : dégâts convergents, d'aspect tornadique

Sur le flanc nord du vallon, depuis la combe de Monterban jusqu'à l'extrémité nord de La Chaux-de-Fonds, on retrouve une série de dégâts convergents d'orientation est, sud-est, sud, ouest et nord-ouest et très localisés, à l'image des arbres couchés dans des orientations opposées sur la **Figure 31**. Sur la photo au niveau de zoom le plus fort en bas à gauche, on remarque que sur à peine 40 m de distance, des arbres sont couchés vers l'ouest, vers le sud et vers l'est, soulignant encore une fois le caractère extrêmement local de la rotation des vents. Ces signatures correspondent

géographiquement au passage de la frange nord du mésocyclone au-dessus de La Chaux-de-Fonds et laissent fortement soupçonner le passage d'une circulation tornadique (voir Fujita 1980 ; Beck and Dotzek 2010 ; Rodriguez and Bech, 2020 ; Rodriguez et al. 2020).
Les parties nord de chacune des zones de dégâts font souvent apparaître des orientations nord-ouest voire nord localement, probablement en lien avec l'alimentation de la cellule par tirage d'est à nord-est (voir schéma conceptuel de la **Figure 22**) et vraisemblablement accentués par le passage d'une tornade.

Figure 31 : dégâts observés sur le flanc nord de La Chaux-de-Fonds, zone marquée d'un rectangle noir (N3) sur la carte en haut à gauche. L'échelle est indiquée dans le coin inférieur droit de chaque photo. Source : SITN, SwissTopo, mis en forme avec QGIS par Pamela Probst (MétéoSuisse)

4.1.3 Flanc sud : dégâts souvent linéaires, de type microrafale

L'orientation des dégâts est sensiblement différente sur le flanc sud du vallon de La Chaux-de-Fonds avec des arbres voire des portions de bosquets souvent couchés dans la même direction, comme le montrent les photos sur la **Figure 32**. Les orientations sont généralement entre l'ouest et le sud-ouest, les arbres couchés d'ouest en est recouvrant ceux couchés du sud-ouest vers le nord-est, confirmant la chronologie de la rotation progressive des vents du sud à l'ouest en passant par le sud-ouest au moment où la cellule a traversé le vallon de La Chaux-de-Fonds.

Cette linéarité sur quelques dizaines de mètres est typique de vents descendants soufflant dans la même direction, et fait donc suspecter plutôt une microrafale dans la bordure sud de la supercellule. Cette hypothèse est cohérente géographiquement avec le passage et l'enroulement du courant descendant du flanc arrière de la supercellule (voir Fujita, 1981 ; Rodriguez et al. 2020 ; Groenmeijer et al. 2023).

Figure 32 : dégâts observés sur le flanc sud et est de La Chaux-de-Fonds, zones marquées de rectangles jaunes sur la carte en haut à gauche. L'échelle est indiquée dans le coin inférieur droit de chaque photo. Source : SITN, SwissTopo, mis en forme avec QGIS par Pamela Probst (MétéoSuisse)

4.2 Valeur de vent mesuré et plausibilité

La rafale maximale d'une seconde de 217 km/h à la station SwissMetNet (SMN) de La Chaux-de-Fonds se situe juste en dehors du champ de validité de l'instrument de mesure. Néanmoins, l'ensemble des conditions météorologiques, le déroulement de l'événement, l'installation ou l'entretien de la station, le contrôle opérationnel de la qualité des données ainsi que les comparaisons avec des mesures effectuées à proximité sur l'aérodrome et l'analyse des dégâts rendent cette valeur plausible. En l'absence d'une meilleure approximation de la réalité, la valeur mesurée est considérée comme valide et conservée pour une utilisation ultérieure dans le cadre d'analyses climatologiques.

4.2.1 Situation de la station de mesure

MétéoSuisse exploite une station de mesure automatique à La Chaux-de-Fonds sur le site de l'aérodrome des Éplatures depuis le 1er janvier 1980. Depuis novembre 2005, la station se trouve à son emplacement actuel.

Le terrain est légèrement incliné vers le sud-ouest. Comme le montre la **Figure 33**, au sud, un cimetière jouxte la station ; il est entouré d'un mur et comprend des arbres isolés et relativement bas. Au sud-ouest se trouvent deux bâtiments à 100 et 125 mètres.

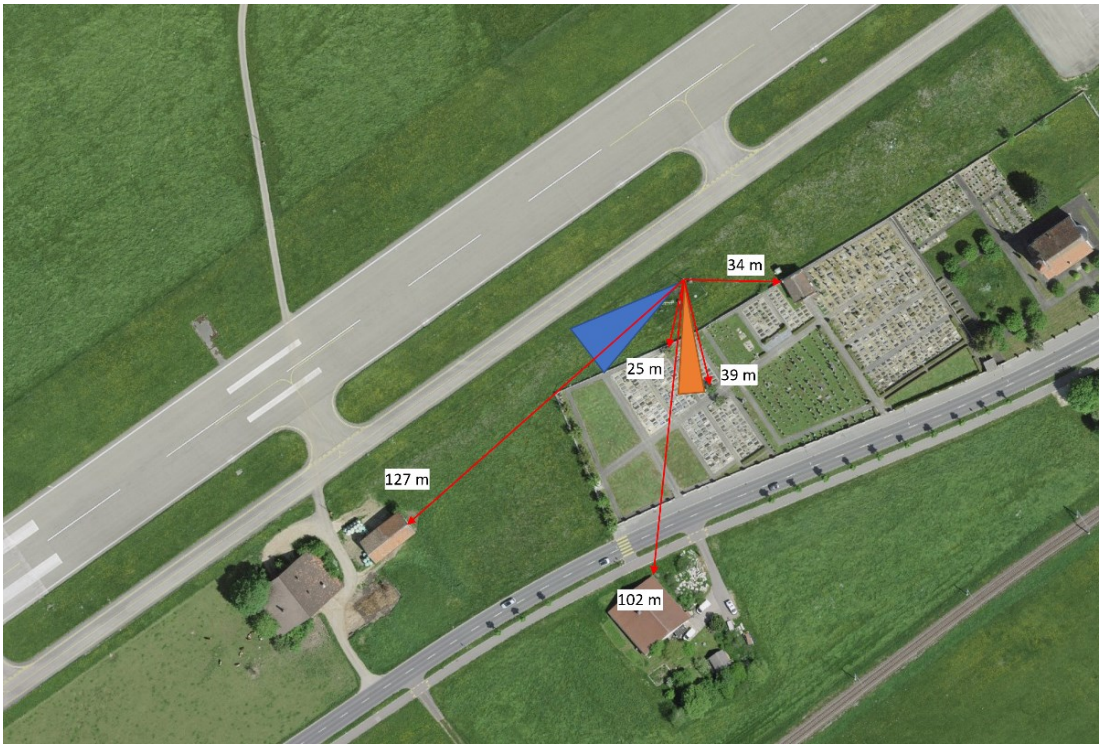

Figure 33 : vue aérienne de la station de mesure avec distance aux obstacles les plus proches. En orange : plage des directions du vent dans la minute précédant le pic de rafale maximale. En bleu : plage des directions du vent dans la minute suivant le pic de rafale maximale.

4.2.2 Appareil de mesure

La station SMN de La Chaux-de-Fonds utilise un anémomètre à coupelles avec girouette à double lame du type 14512 de la société Lambrecht. Celui-ci est monté sur un mât à 10 m au-dessus du sol, conformément aux normes de l'OMM. Il est équipé d'une sonde de mesure de la pression atmosphérique. Selon la spécification du fabricant[i] , la plage de mesure spécifiée et étalonnée par le fabricant se situe entre 0 et 35 m/s, la limite de la plage d'utilisation étant indiquée à 60 m/s. La précision est de ±2 % de l'ensemble de la plage de mesure et la résolution est de 0,1 m/s.

Ce qui est pertinent pour l'événement, c'est la caractéristique fondamentale des anémomètres à coupelles, à savoir que les courtes pointes de vent dans la nature sont plus fortes que les valeurs de mesure enregistrées[ii] . Ni la maintenance hebdomadaire effectuée par l'exploitant de l'aérodrome, ni l'entretien annuel de la station n'ont révélé d'anomalies quant au bon fonctionnement de l'appareil de mesure au cours des dernières années.

4.2.3 Certification

Les stations SMN sont régulièrement inspectées et certifiées par un organisme indépendant (METAS-Cert)[iii] . Le respect des directives de l'OMM[1] concernant les instruments de mesure utilisés et

leur installation est notamment vérifié. Pour la station de La Chaux-de-Fonds, la certification a eu lieu pour la dernière fois le 9 septembre 2021. Les données présentées dans la **Figure 33** montrent les obstacles qui entraînent une augmentation de la rugosité moyenne de l'environnement (par effet de frottement de l'air avec le sol). Pour la mesure du vent, il en résulte la classe de site 3 sur 5 et le résultat de certification "compliant". Au total, les restrictions constatées dans le cadre de la certification tendent à réduire les rafales maximales mesurées.

4.2.4 Contrôle opérationnel de la qualité des données

Dans le cadre du contrôle opérationnel des données de MétéoSuisse, toutes les stations SMN passent par plusieurs étapes de contrôle automatique. Les valeurs anormales sont détectées pour passer un contrôle. L'évolution temporelle des différentes valeurs mesurées ainsi que la comparaison entre les différents paramètres étaient cohérentes et plausibles. Les mesures de vent ne montraient pas de valeurs aberrantes ni de lacunes suspectes pendant l'événement. Le capteur de cette station n'a présenté aucune anomalie pendant toute sa durée de fonctionnement dans le cadre du contrôle opérationnel des données.

4.2.5 Saisie des valeurs de mesure et traitement des signaux

Les données de mesure des stations SMN sont transmises toutes les 10 minutes et stockées à cette même résolution. En plus des données de mesure proprement dites, des grandeurs statistiques sont dérivées. Pour le vent, on dispose de l'écart-type et du nombre d'échantillons valables.
Comme la station se trouve sur un aéroport régional, les mesures de l'anémomètre pour le système météo aéronautique SMART sont échantillonnées à un intervalle fixe de 3 secondes et enregistrées séparément. Des mesures complémentaires sont effectuées sur deux autres sites avec des anémomètres à ultrasons sur la tour de l'aéroport des Éplatures (pour redondance) ainsi que sur le mât d'émission de Swisscom au Mont Cornu, à peine 6 km au nord-est de l'aéroport des Éplatures, voir la **Figure 34**.

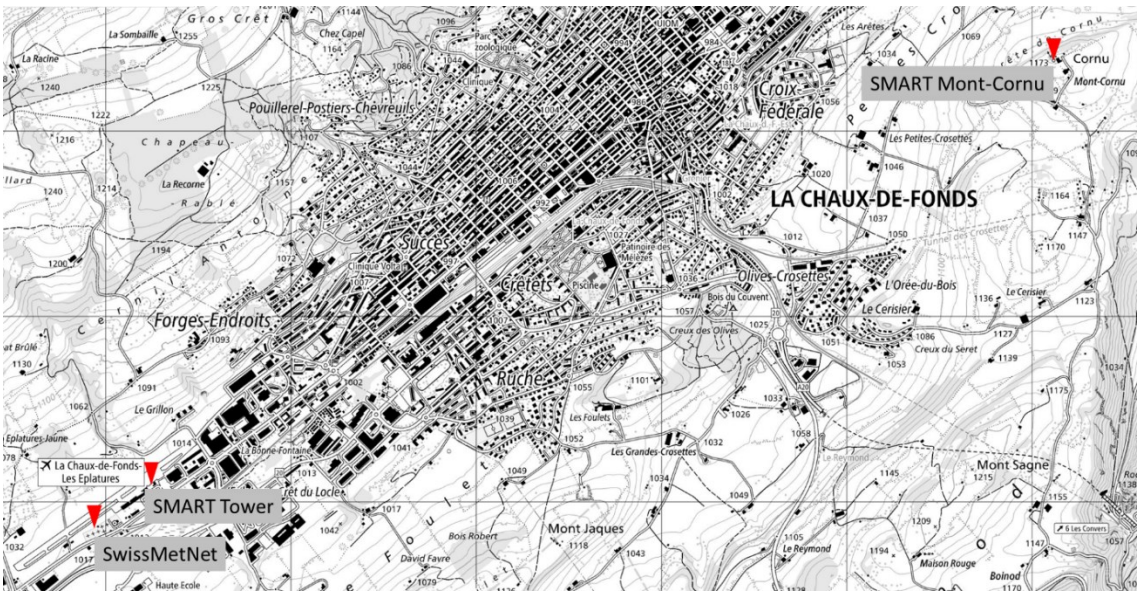

Figure 34 : emplacements des mesures de vent à la station SwissMetNet, sur la tour de l'aéroport régional (SMART Tower) ainsi que sur le mât d'émission de Swisscom au Mont Cornu (SMART Mont-Cornu)

Les deux instruments installés sur la tour ne fournissent pas toujours des valeurs valables et il est très probable que la rafale maximale ait été manquée sur la tour. En effet, les anémomètres à ultrasons sont en principe fiables pour mesurer la direction et la vitesse du vent, mais ils sont sensibles aux perturbations du signal ultrasonore. Une séquence vidéo enregistrée depuis la tour[iv] montre qu'à l'approche du front de rafale, l'air s'est chargé d'éléments volatiles, ce qui rend plausible le fait que les valeurs mesurées manquent ou soient jugées inutilisables par le capteur lui-même précisément pendant la période des rafales les plus fortes. Les valeurs maximales de 36 et 40 m/s mesurées sur la tour et présentées sur la **Figure 35** ci-dessous représentent donc une valeur limite inférieure pour les pointes de rafales sur 3 secondes qui s'y sont effectivement produites.

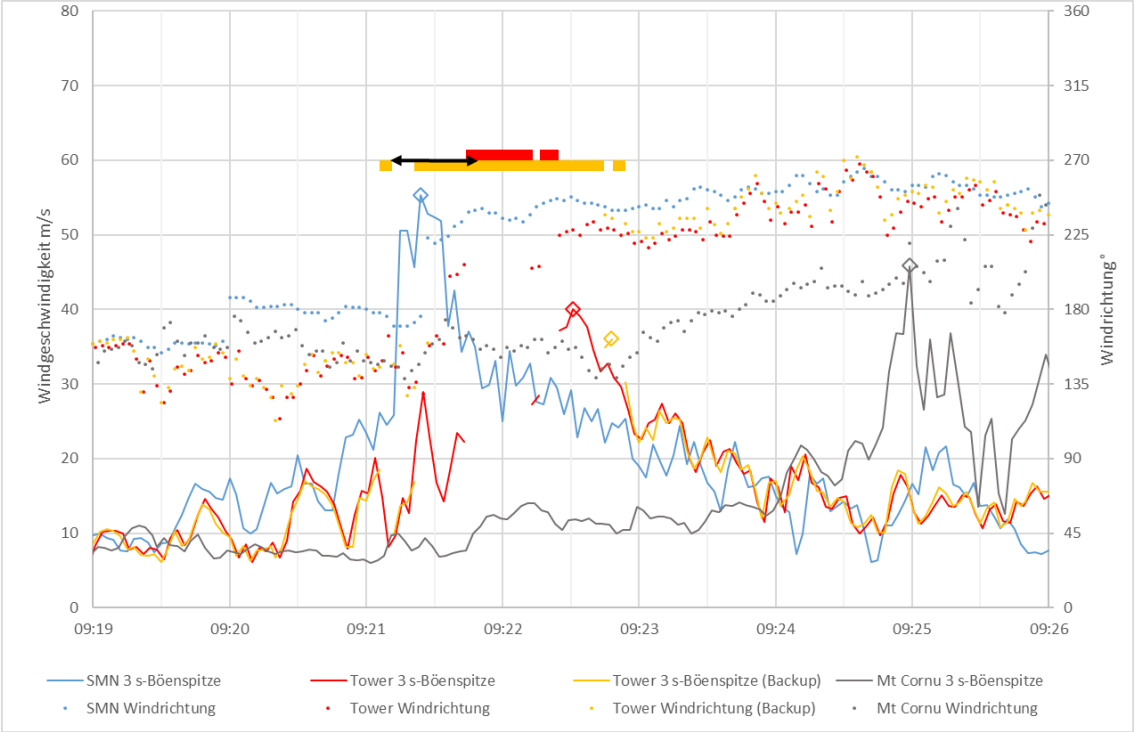

Figure 35 : rafales maximales sur 3 secondes (lignes continues), y compris les valeurs maximales mesurées (représentées par des carrés) et la direction du vent (points) des mesures de SwissMetNet et des mesures supplémentaires de SMART. Les barres rouges et jaunes indiquent les périodes pour lesquelles il n'existe pas de valeurs de mesure valables pour les appareils de mesure de la tour. La flèche noire indique la période des enregistrements vidéo de la tour.

4.2.6 Plausibilité des valeurs mesurées

L'appareil de mesure utilisé n'est calibré que jusqu'à 35 m/s et la rafale maximale sur une seconde a juste dépassé la limite de la plage d'utilisation de 60 m/s indiquée par le fabricant. La rafale maximale d'une seconde de 217 km/h (60,4 m/s) à la station SMN de La Chaux-de-Fonds ne peut donc pas être confirmée de manière définitive, car elle se situe en dehors du champ de validité de l'instrument de mesure. Des tests poussés de l'appareil en soufflerie n'ont pas été menés car les conditions turbulentes réelles n'auraient pas pu être reproduites.

D'autre part, les rafales mesurées sur 3 secondes montrent que d'autres rafales maximales similaires ont été enregistrées, elle se situent juste en dessous de la valeur limite de certification. Toutefois, la situation météorologique globale, le déroulement de l'événement, l'installation et l'entretien de la station, le contrôle opérationnel de qualité des données ainsi que les comparaisons avec d'autres

mesures effectuées sur l'aérodrome et les photos des dégâts rendent plausibles les valeurs de rafale maximale sur une seconde de 60,4 m/s et de rafale maximale moyennée sur 3 secondes de 57,0 m/s. En l'absence d'une meilleure approximation de la réalité, la valeur mesurée est considérée comme valide et conservée pour une utilisation ultérieure dans le cadre d'analyses climatologiques.

4.3 Conclusion sur la caractérisation de l'événement

Dans cette section, nous avons pu démontrer que la répartition géographique de dégâts de natures différentes est cohérente avec la trajectoire et la structure de l'orage supercellulaire sur sa trajectoire à travers la ville.

En particulier, les analyses des dégâts sur place ainsi que les orthophotos aériennes permettent de mettre en évidence des secteurs d'orientations des arbres couchés par endroits plutôt rectilignes voire divergents, cohérents avec la thèse de microrafale et dans d'autres clairement convergents et plutôt en adéquation avec le passage d'une tornade.

Par ailleurs, les vidéos et témoignages recueillis par la suite (non partagés ici) attestent également d'une nature à la fois soudaine et rectiligne des vents mais également convergente par endroits voire tourbillonnante.

La partie sud de l'orage était plutôt concernée par des rafales descendantes de type micro-rafales associées au courant descendant du flanc arrière de l'orage supercellulaire. A contrario, la partie nord de la ville se trouvait dans une zone davantage à risque d'être affectée par une rotation tornadique, puisque située dans la zone de convergence entre le courant descendant du flanc arrière et celui du courant de tirage du courant ascendant.

La **Figure 36** présente ces conclusions à l'aide d'une carte annotée des vecteurs de vent déduits de la géométrie des dégâts sur le terrain. Elle résume l'ensemble des analyses en associant les phénomènes météorologiques probablement responsables ainsi que leur tracé.

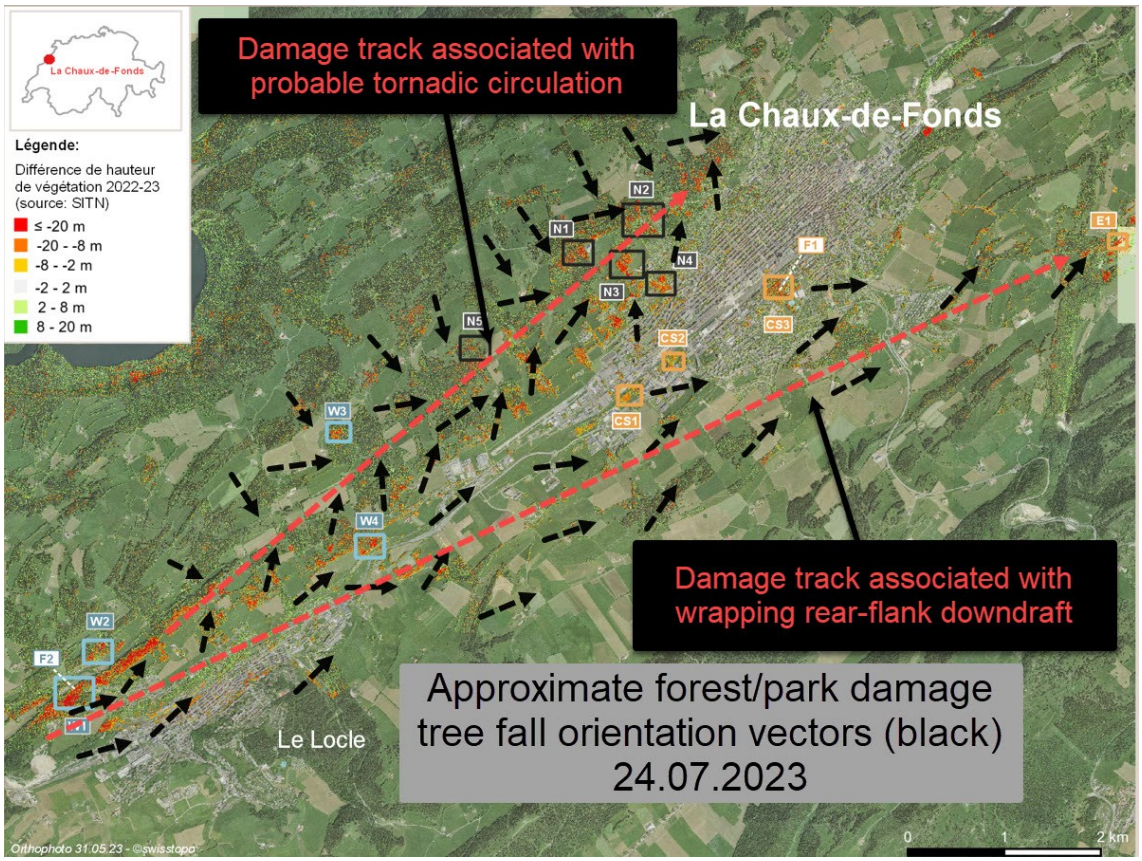

Figure 36 : représentation de l'orientation approximative d'effondrement des arbres autour de la ville de La Chaux-de-Fonds observée suite à l'épisode orageux (vecteurs noirs). En traitillés rouges, les tracés approximatifs à l'origine des dégâts : côté sud, des vents de type microrafales, davantage rectiligne, côté nord une probable circulation tornadique avec un effondrement des arbres par endroits fortement convergent. Source de l'image de fond : Swisstopo et SITN, annotée par Lionel Peyraud.

Ci-dessous dans la **Figure 37**, à gauche, le schéma conceptuel des flux de vents proches du sol associés à un phénomène convectif venteux de type hybride « microrafale/tornade », superposés sur la photo de la supercellule qui a balayé La Chaux-de-Fonds, à droite.

Figure 37 : à gauche, schéma conceptuel des flux de vents proches du sol associés aux phénomènes convectifs venteux de type hybride "microrafale/tornade" et, à droite, représentation visuelle (webcam Roundshot annotée) de l'orage supercellulaire à haute précipitation approchant la ville de La Chaux-de-Fonds depuis l'ouest le 24.07.2023.

Les violentes rafales associées à cet orage supercellulaire semblent être la résultante de plusieurs éléments et structures rentrés en phasage juste en amont de la ville de La Chaux-de-Fonds. A savoir, un écroulement de la colonne des précipitations de l'orage qui s'enroule autour de la circulation mésocyclonique de l'orage supercellulaire HP en tant que courant descendant du flanc arrière. Ce faisant, il entraîne vers le bas et avec lui les restes du courant-jet entrant arrière présent dans les couches moyennes. Conjointement à ce phasage, la propagation jusqu'au sol du très puissant courant descendant du flanc arrière imbibé de précipitations a très probablement aidé à amorcer une circulation tornadique derrière ce rideau de précipitations à l'intersection du flux de tirage de l'orage et du courant descendant du flanc arrière. Cette très probable circulation tornadique semble s'être mêlée aux rafales descendantes du franc arrière, notamment dans la région du Crêt-du-Locle et le long de la frange nord de la ville de La Chaux-de-Fonds, renforçant encore le potentiel destructeur de cette supercellule qui a balayé la région en l'espace d'une dizaine de minutes.

5 Mise en contexte climatologique

La rafale mesurée sous cet orage est la plus forte valeur sur une seconde relevée à la station de La Chaux-de-Fonds depuis le début des mesures automatiques en 1980. Seules 5 stations situées sur des sommets alpins ou des cols à plus de 2000 m d'altitude ont relevé des valeurs plus élevées sur la même période. Il faut cependant tenir compte du fait que les processus liés aux événements convectifs sont extrêmement localisés et génèrent de fortes variations spatiales. Il s'agit donc, dans une certaine mesure, d'un hasard si des rafales d'orage se sont produites sur une station de notre réseau de mesure. On peut supposer avec une certaine probabilité que des rafales d'intensité similaire, voire plus forte, se sont produites durant la même période, mais sans être attestées par des mesures.

5.1 Classification temporelle de la rafale relevée dans la série de mesures de La Chaux-de-Fonds

En principe, les mesures de vent de MétéoSuisse ne peuvent être utilisées de manière pertinente pour des évaluations climatologiques qu'à partir de l'introduction de mesures automatiques. A La Chaux-de-Fonds, les mesures automatiques du vent sont disponibles depuis le 1er janvier 1980.

Les vents les plus forts enregistrés durant cette période à la station de La Chaux-de-Fonds l'ont tous été lors de tempêtes hivernales. La rafale sur une seconde la plus élevée, s'élevant à 134,6 km/h, a été mesurée au passage de la tempête Lothar le 26 décembre 1999.

Des analyses des valeurs extrêmes des rafales maximales sur 1 seconde sont disponibles pour différentes stations du réseau SMN. Pour La Chaux-de-Fonds, la période 1982 à 2022 a été évaluée. Les données ont fait l'objet d'un contrôle de qualité, mais ne sont pas homogénéisées.

Sur la base de ces données, la valeur d'une rafale maximale, qui selon le graphique de la **Figure 38** ci-après a une probabilité statistique d'occurrence de 1/300 par an (période de retour moyenne de 300 ans) est estimée entre 127 et 189 km/h. La rafale de 217 km/h présente donc une période de retour nettement plus élevée et représente donc une valeur aberrante d'un point de vue statistique.

En remontant plus loin dans le temps, des tornades se sont toutefois produites à plusieurs reprises dans le massif du Jura, causant parfois des dégâts importants et laissant supposer des rafales maximales supérieures à celles prises en compte pour l'analyse des valeurs extrêmes.

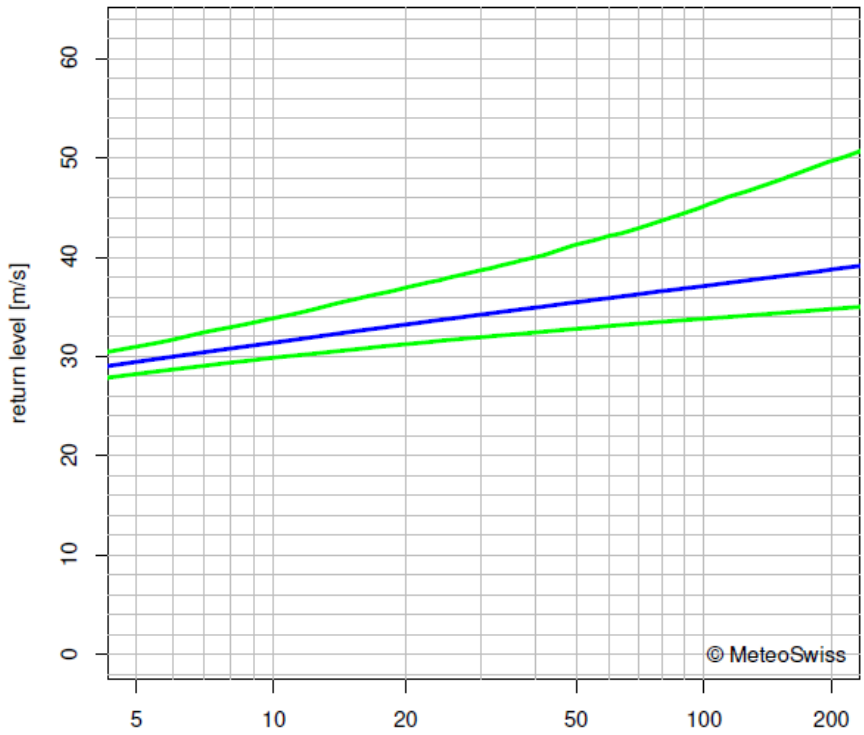

Figure 38 : analyse des valeurs extrêmes des rafales sur une seconde mesurée à la station SwissMetNet de La Chaux-de-Fonds de 1982 à 2022. Le classement de la rafale du 24 juillet 2023 donne une période de retour moyenne largement supérieure à 300 ans. Source : MétéoSuisse

5.2 Classement spatial de la valeur mesurée

Sur la période depuis 1982, parmi les stations SMN disposant de séries de mesures plus longues (au moins 20 ans) avec des données vérifiées, seules 5 ont relevé des rafales plus fortes que dans le cas de l'orage de La Chaux-de-Fonds. Ces stations sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 1: Stations SMN qui ont enregistré les rafales maximales sur 1 s les plus fortes au depuis 1982.

Station	Altitude au-dessus du niveau de la mer [m]	Vitesse de la rafale maximale sur 1 seconde [m/s]	Date
Col du Grand St-Bernard	2472	74.5 ms^{-1}	27.02.1990 (tempête Vivian)
Jungfraujoch	3571	74.3 ms^{-1}	06.01.1998 (tempête Fanny)
Weissfluhjoch	2691	64.5 ms^{-1}	27.02.1990 (tempête Vivian)
Säntis	2501	63.8 ms^{-1}	26.12.1999 (tempête Lothar)
Gütsch, Andermatt	2286	62.8 ms^{-1}	17.12.1983 (tempête de foehn)
La Chaux-de-Fonds	1017	60.4 ms^{-1}	24.07.2023 (orage)

Toutes ces stations sont situées sur des sommets ou des cols alpins exposés et les rafales maximales se sont produites pendant le semestre d'hiver lors de tempêtes ou de situations de foehn.

Tant pour la classification de la rafale maximale dans la série de mesures actuelle que pour la comparaison spatiale avec d'autres stations, il faut tenir compte du fait que les processus lors d'événements convectifs sont à très petite échelle et présentent des variations spatiales considérables. Il s'agit donc, dans une certaine mesure, d'un hasard que ces rafales d'orage se soient produites sur le réseau de mesure. On peut supposer avec une certaine probabilité que des rafales d'intensité similaire, voire plus forte, se sont produites durant la même période, mais qu'elles sont passées entre les mailles du réseau de mesures.

6 Performance des outils et modèles, avertissements émis

La prévision des phénomènes orageux, par nature localisés, s'avère toujours délicate malgré l'amélioration des modèles et outils. Ce chapitre décrit les performances des modèles, les avertissements émis et des outils de nowcasting disponibles en amont / pendant le déroulé de l'événement.

Les paragraphes qui suivent ciblent 2 des paramètres déterminants de cet orage, à savoir les intensités de précipitations et les vents tels que prévus par les différents modèles de prévision numérique utilisés en opérationnel à MétéoSuisse, à savoir le modèle global IFS fourni par ECMWF et les modèles régionaux COSMO-2E et COSMO-1E opérés par MétéoSuisse.

6.1 Modèles de prévision numérique

Le modèle IFS qui alimente les modèles à haute résolution de MétéoSuisse avait globalement bien cerné les ingrédients synoptiques de cette situation, comme décrit en section 2. Pour COSMO les éléments remarquables à la méso-échelle tels que le cisaillement ou le MUCAPE ont été bien anticipés (voir section 2.2). En revanche, même à une faible échéance de prévision (runs de 00 UTC et 03 UTC, soit 9 et 6h avant l'événement), la version de COSMO avec une résolution horizontale 1.1 km COSMO-1 CTRL a sous-estimé les réflectivités ainsi que les rafales maximales.

La prévision de réflectivité du run COSMO-1 CTRL de 00 UTC le 24.07.2023 présentée sur la **Figure 39** fait ressortir un signal plus marqué qui se propage le long du Jura entre 08 et 09 UTC. Des structures arquées sont clairement identifiables dans ces prévisions déterministes, notamment à 09 UTC et 10 UTC sur le Plateau. La vitesse de déplacement du système prévue dans ce run déterministe était remarquablement importante, puisqu'entre 09 et 10 UTC la structure de réflectivité prévue se décalait du Plateau fribourgeois à la région d'Aarau, soit une distance de plus de 100 km, en 1h. Les éléments visibles dans cette prévision de 00 UTC constituaient des symptômes d'un événement orageux potentiellement rafaleux.

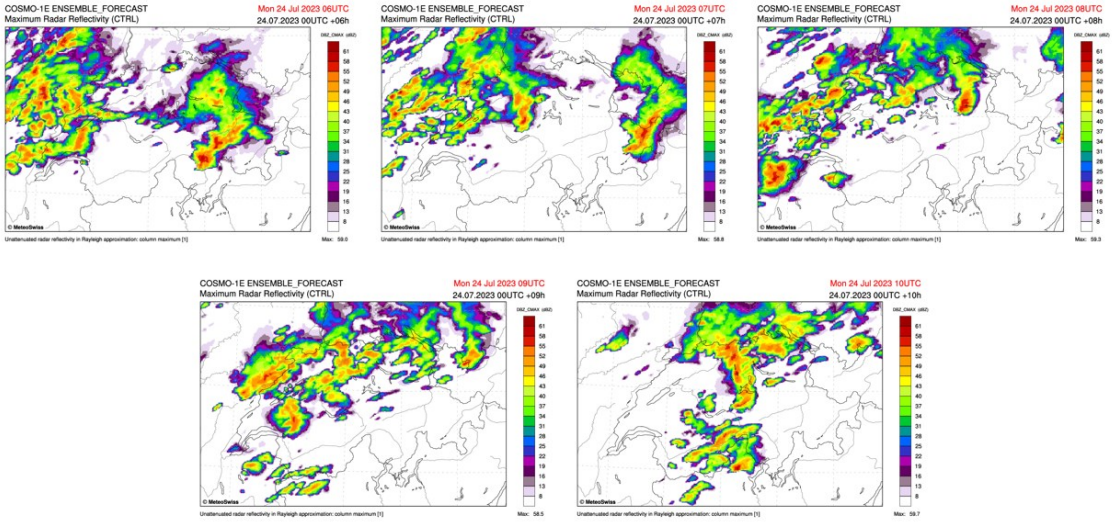

Figure 39 : réflectivités radar maximales prévues à 06, 07, 08, 09 et 10 UTC (respectivement de haut à gauche en bas à droite) le 24.07.2023 par COSMO-1 CTRL. Source : MétéoSuisse

En revanche, le timing de l'événement a été mal intégré et tendait à être retardé, comme le montrent les rafales maximales sur 3h prévues par les 2 runs successifs de 00 et 03 UTC de la **Figure 40** ci-dessous.

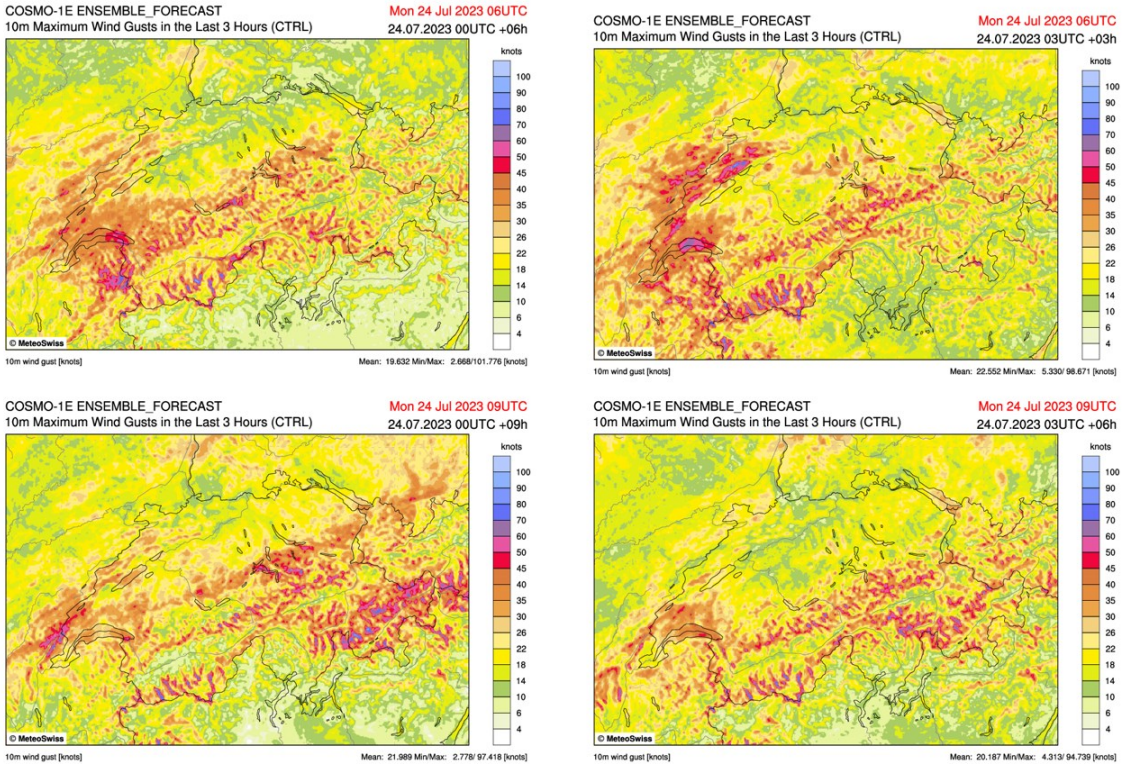

Figure 40 : rafales maximales sur 3h (en kt) prévues à 06 UTC et 09 UTC (en haut, resp. en bas) par les runs COSMO-1 CTRL de 00 UTC (à gauche) et de 03 UTC (à droite). Source : MétéoSuisse

Une forte dispersion spatiale et temporelle est observée dans les ensembles, aussi bien pour COSMO-1E que pour COSMO-2E.

Les rafales prévues étaient évidemment bien en dessous des valeurs observées. Néanmoins, le maximum de la distribution des rafales maximales sur 6h prévue par COSMO-1E présentée dans la **Figure 41** ci-après avec une échéance de prévision de 12h s'approchait de valeurs de150 à 170 km/h, ce qui n'était pas si éloigné des valeurs mesurées. Malgré cela, les valeurs de rafales maximales prévues par la majorité des membres étaient très nettement sous-estimées avec un Q75 à peine à 90 km/h, ce qui témoigne d'une grande dispersion sur les rafales les plus hautes prévues.

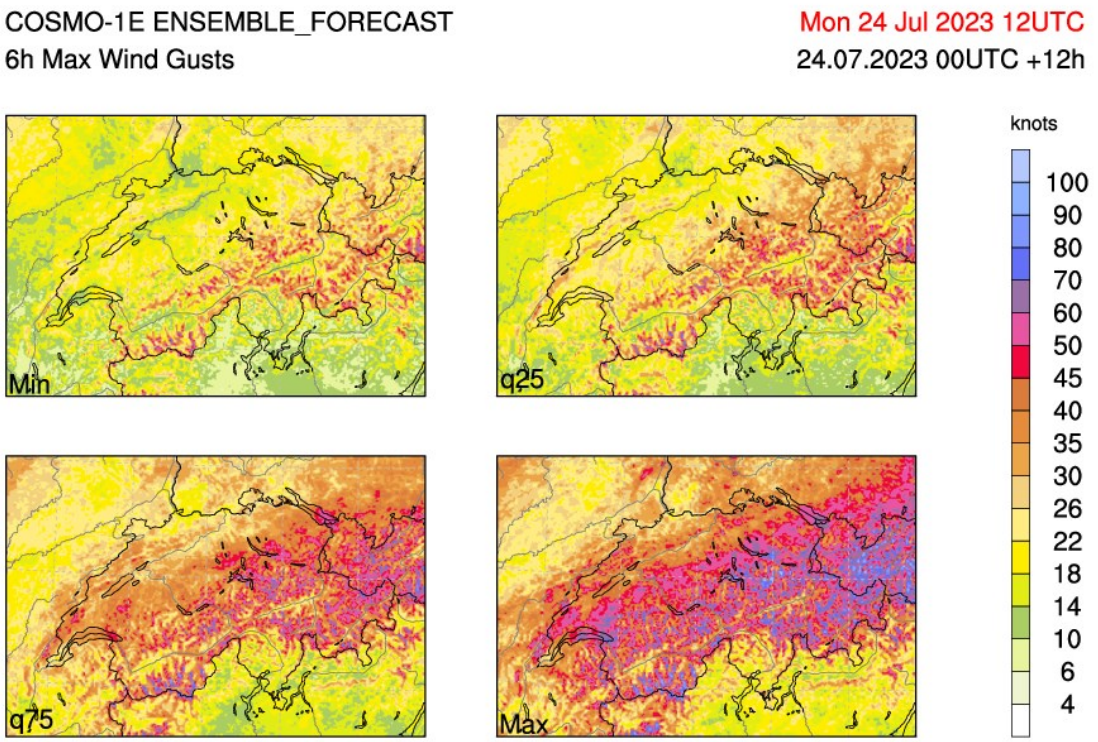

Figure 41 : quantiles (min, Q25, Q75 et max) des rafales maximales prévues (en kt) entre 06 et 12 UTC par le run COSMO-1E de 00 UTC le 24.07.2023. Source : MétéoSuisse

Les prévisions de COSMO-2E disponibles la veille présentaient également une importante dispersion. Les runs de 00 et 12 UTC du 23.07.2024 fournissaient des solutions très différentes, comme le montre la comparaison des quantiles de rafales maximales sur 6h des **Figure 42** et **Figure 43** ci-après.

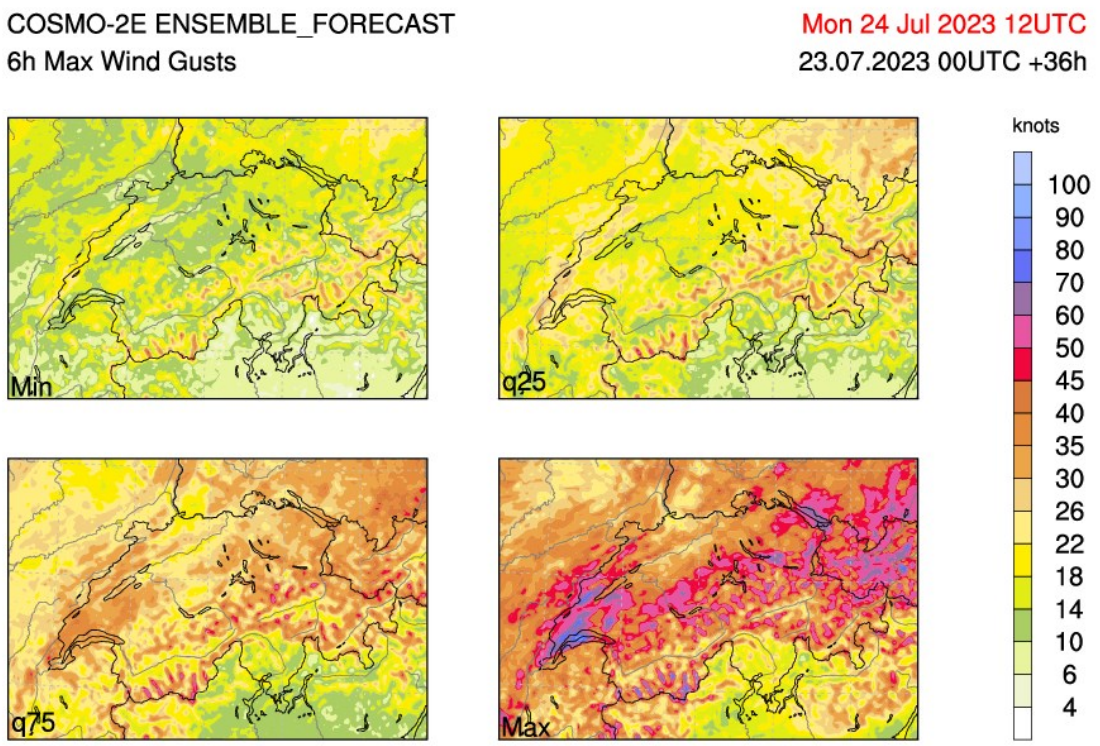

Figure 42 : quantiles (min, Q25, Q75 et max) des rafales maximales prévues entre 06 et 12 UTC par le run COSMO-2E de 00 UTC le 23.07.2023. Source : MétéoSuisse

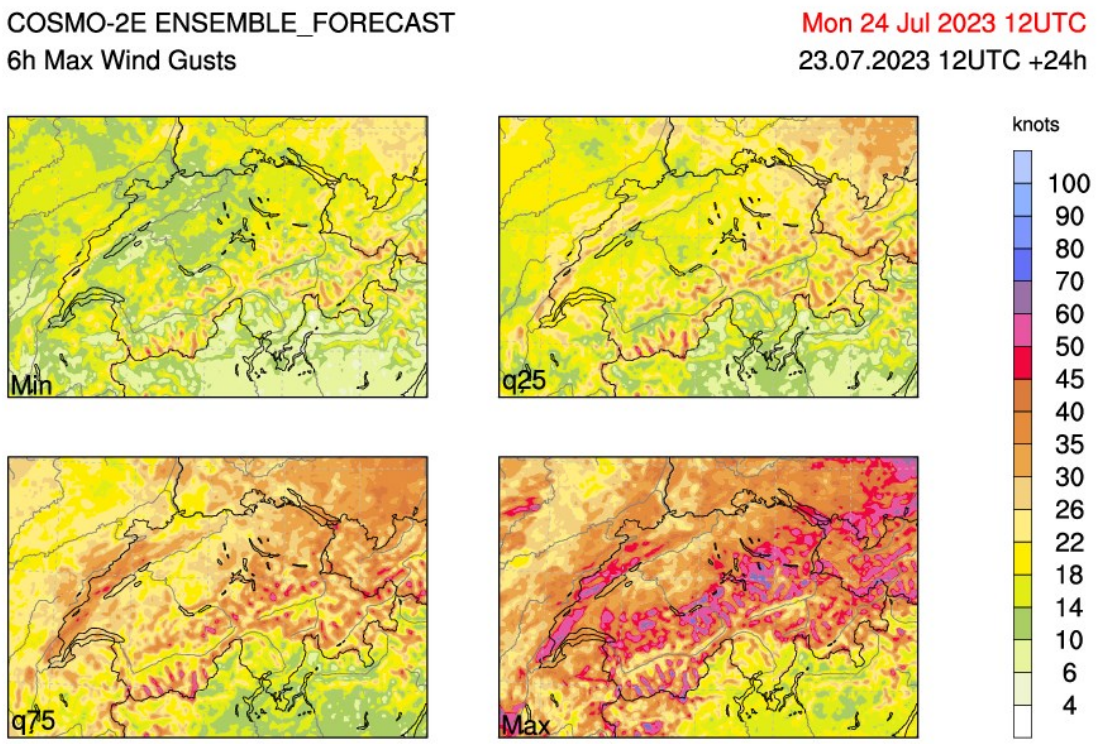

Figure 43 : quantiles (min, Q25, Q75 et max) des rafales maximales prévues entre 06 et 12 UTC par le run COSMO-2E de 12 UTC le 23.07.2023. Source : MétéoSuisse

On remarque également que les valeurs maximales de rafales sur 6h du run COSMO-2E de 00 UTC le 23.07.2023 étaient plus proches de l'observation, malgré une échéance plus importante. En revanche, le run de 12 UTC semble avoir mieux localisé la bande de rafales maximales le long du Jura, tandis que celui de 00 UTC ciblait plutôt l'ouest du Plateau.
Les modèles avaient globalement bien anticipé les ingrédients synoptiques favorables à la convection organisée. En revanche, COSMO-1 et 2 montraient une grande dispersion spatio-temporelle sur les développements convectifs et les membres ont tous sous-estimé les intensités de précipitations ainsi que les rafales maximales.

6.2 Avertissements émis

Le potentiel explosif et très incertain de cette situation avait motivé l'émission d'une pré-alerte de niveau 3 (*warning-outlook*) la veille, le 23 juillet vers midi, soit environ 24h avant l'événement. Le développement d'une cellule orageuse étant un phénomène local et imprévisible, ces pré-alertes concernent généralement de grandes régions. Dans le cas de cet orage, la pré-alerte visait la quasi-totalité du territoire Suisse et toute la journée du 24 juillet. Néanmoins, les valeurs d'instabilité limitées ainsi que le signal convectif dispersé dans l'espace et le temps ont conduit à émettre cette pré-alerte sans couplage à un préavis aux autorités.

La nature isolée et explosive de l'orage ainsi que sa rapidité de déplacement mettent à mal le suivi nowcasting (à court terme) du phénomène. L'absence d'indicateurs et de mesures en temps réel de violentes rafales au sol sur le territoire français en amont ne permet pas de soupçonner la sévérité réelle de la cellule et donc cette dernière d'aspect modérément intense selon les réflectivités radar n'est pas avisée manuellement par un flash-orage. Quant à l'intensité estimée de la cellule jaugée par les algorithmes automatiques de détection des cellules orageuses virulentes, celle-ci n'atteint pas les seuils permettant de déclencher un flash-orage automatique. Après que la rafale de 217 km/h ait été constatée aux Éplatures, la cellule est avisée par un flash-orage (envoyé manuellement) qui est valide uniquement en aval de La Chaux-de-Fonds sur le reste de sa trajectoire.

7 Communication et retombées médiatiques

Cet orage d'une rare violence a coûté la vie à une personne et une quarantaine d'autres ont été blessées. Il a occasionné des dégâts matériaux chiffrés entre 70 et 90 millions de francs (RTS, 26 juillet 2023). Les intempéries ont causé d'importants dégâts. Les journalistes ont écrit que l'orage, avec une rafale estimée à 217 km/h, a frappé la ville vers 11h30. Ils ont indiqué que, selon les météorologues, il s'agissait plus probablement d'une forte rafale d'orage. Dans un premier temps, les médias avaient également parlé d'une tornade.

La couverture médiatique de l'événement a été majoritairement objective et concentrée sur quelques jours. Le sujet n'a pas été exploité sur une longue période. Malgré cela, les journalistes ont utilisé de nombreux superlatifs dans leurs reportages. Les records ou les phénomènes météorologiques imprévisibles offrent des accroches bienvenues pour les articles. Un autre point à prendre en compte lors de la rédaction d'un article est la classification de ces records. Un lien de cause à effet entre un événement météorologique précis et le changement climatique est de plus en plus souvent établit, parfois de façon un peu rapide. Ce n'est qu'après l'événement que la question de la qualité des avertissements de MétéoSuisse a été soulevée.

MétéoSuisse a répondu à une soixantaine de sollicitations des médias (allemands, français et italiens) en rapport avec cet orage à La Chaux-de-Fonds. Au total, ce sont environ 500 articles de presse dans les trois langues qui ont été publiés. Parmi ceux-ci figurent des questions sur le type de phénomène, le lien avec le changement climatique ou les alertes de MétéoSuisse.

L'ampleur de la couverture médiatique durant la période du 24 juillet au 1er août 2023, présentée à l'aide du graphique de la **Figure 44**.

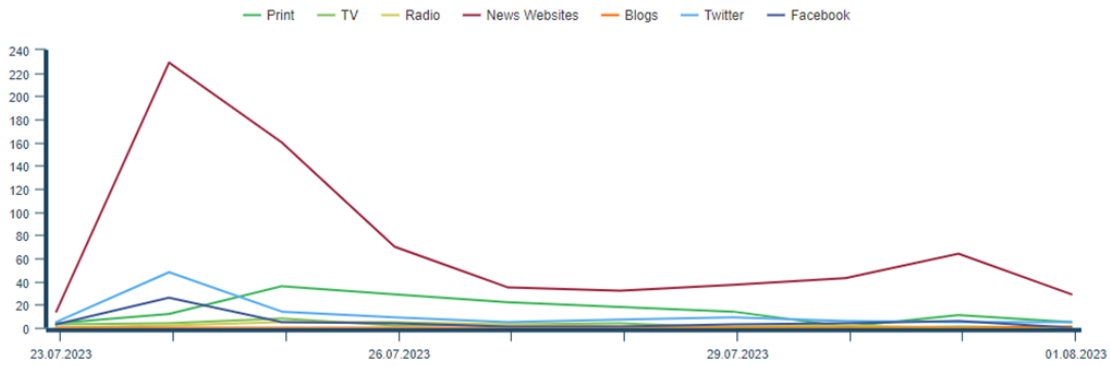

Figure 44 : canaux utilisés lors de la phase de couverture médiatique (24 juillet au 1er août 2023)

La plus grande partie de la couverture médiatique a eu lieu immédiatement après l'événement. Les questions les plus importantes pour les journalistes gravitaient autour de la caractérisation du phénomène. S'agissait-il d'une rafale d'orage (*downburst*) ou d'une tornade ? Les journalistes voulaient également des informations précises sur la valeur de vent mesurée. Au fur et à mesure que les jours passaient, l'accent a été mis sur le changement climatique et son lien avec de tels événements. Là aussi, MétéoSuisse a donné une évaluation claire, notamment en allemand et en français.

Les illustrations des **Figure 45** et **Figure 46** montrent sur quels canaux les reportages se sont concentrés : pages d'information et X/Twitter. La répartition par canal le montre clairement.

Figure 45 : le Word Cloud visualise les mots-clés qui sont apparus le plus souvent dans les reportages des médias dans toute la Suisse. Les termes ou catégories les plus importants et les plus fréquents sont représentés en plus grand et les plus rares en plus petit. La période de référence s'étend du 23 juillet au 31 juillet 2023.

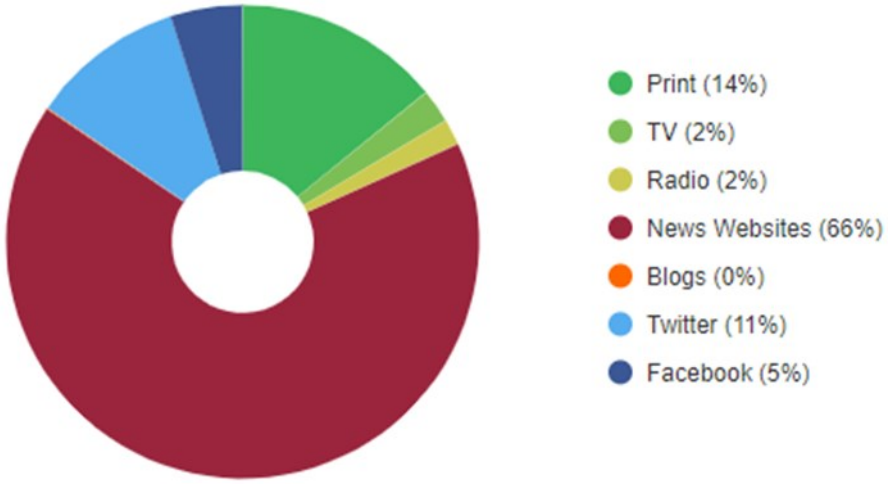

Figure 46 : répartition de la couverture médiatique par canal de communication.

Pendant l'événement, il était difficile pour les journalistes de rendre compte avec précision sur le plan météorologique. En tant que service météorologique national et institution scientifique, MétéoSuisse est tenu de fournir des informations précises sur les termes utilisés. Cela n'a pas été possible dans les premiers jours suivant les intempéries, car il était impossible de les déterminer sans analyse approfondie. Les météorologues ont informé activement les médias après avoir analysé et classé les incidents et les termes utilisés.

8 Conclusion

L'orage du 24 juillet 2023 qui a balayé le vallon de La Chaux-de-Fonds est exceptionnel par son intensité et les dégâts occasionnés. Les violentes rafales associées à cet orage supercellulaire semblent être la résultante de plusieurs éléments et structures rentrés en phasage juste en amont de la ville de La Chaux-de-Fonds. Une très probable circulation tornadique semble s'être mêlée aux rafales descendantes du flanc arrière, notamment dans la région du Crêt-du-Locle et le long de la frange nord de la ville de La Chaux-de-Fonds, renforçant encore le potentiel destructeur.

La valeur de rafale maximale de 217 km/h sur 1 s mesurée aux Éplatures se situe juste au-delà de la fourchette de validité de l'instrument de mesure. D'un point de vue climatologique, cette rafale survenue en situation convective est difficile à comparer aux rafales de même ordre de grandeur relevées lors de tempêtes hivernales et, bien que des tornades se soient déjà produites dans le Jura, de telles valeurs n'ont jamais été mesurées. La valeur mesurée le 24 juillet 2023 est donc exceptionnelle. Le déroulement de l'événement, l'entretien de la station, le contrôle opérationnel de la qualité des données ainsi que les comparaisons aux mesures effectuées à proximité et les photos des dégâts rendent néanmoins la valeur mesurée plausible. En l'absence d'une meilleure approximation de la réalité, la mesure est considérée comme valide et conservée pour une utilisation ultérieure dans le cadre d'analyses climatologiques.

Un orage si soudain et d'une telle violence est rare et rend la prévision délicate. Les modèles numériques et les outils de prévision à court terme ne sont aujourd'hui pas encore capables de simuler de manière systématique de tels phénomènes météorologiques du fait de leur caractères extrêmement local dans le temps et l'espace. Le travail accompli tout au long de cette enquête a contribué à enrichir les connaissances sur les orages violents, à consolider les compétences opérationnelles pour leur suivi en temps réel tout en mettant en lumière des axes d'amélioration sur plusieurs plans. Ces pistes d'améliorations se déclinent à la fois sur les outils de suivi en temps réel (nowcasting), les processus d'échanges de données transfrontaliers et la communication. Par exemple, la prise en compte des vents dans l'algorithme de détection des orages violents pourrait permettre de mieux détecter les cellules qui génèrent des rafales fortes jusqu'au sol, en plus de celles qui occasionnent de forts cumuls pluviométriques. Une coopération transfrontalière plus étroite pourrait également permettre d'identifier plus rapidement des cellules qui seraient passées entre les mailles du réseau de mesure mais qui auraient déjà causé des dégâts en amont. Des travaux ont été entrepris pour traiter les différents pistes mises en lumière par ce rapport dans un souci d'amélioration constant des prestations de MétéoSuisse.

Références

Autorités aéroportuaires des Éplatures LSGC, orage du 24 juillet 2023, vidéo en ligne : https://vimeo.com/847984284.

Dessens and Snow, 1993 : Comparative description of tornadoes in France and United States. The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazard. Amer. Geofis. Union 427-434.

European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), modèle global IFS : Documentation en ligne https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model

Fisler, J. et al., 2017 : Quality Assessment using METEO-Cert. The MeteoSwiss Classification Procedure for Automatic Weather Stations. Instruments et méthodes d'observation. Rapport n° 126 de l'Organisation météorologique mondiale, 2017.

Fujita, T. T., and R. M. Wakimoto, 1981 : Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Mon. Wea. Rev., 109, 1438-1456.

Gauthier, 1890 : La trombe-cyclone du 19 août 1890, C. R. Hebd. Seances Acad. Sci., 111, 417-421, 1890.

Herzog and Golaz, 1926 : Le cyclone orageux du12 juin 1926. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 1926, Anhang Nr. 3.

Johns et al., 1993 : Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combinations of wind and instability parameters. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr., No. 79, Amer. Geophys. Union, 583–590.

Kerr et al., 1996 : Storm-relative winds and helicity in the tornadic thunderstorm environment. *Wea. Forecasting*, **11**, 489–505.

Löffler, Hans : Meteorologische Bodenmesstechnik (anciennement : Instrumentenkunde). Offenbach am Main : Guide pour la formation au sein du service météorologique allemand n° 6, auto-édition du service météorologique allemand, 2012.

Manuel d'utilisation de l'anémomètre Lambrecht. Documentation en ligne : https://www.lambrecht.net/upload/manuals/14512_Betriebsanleitung.pdf. (Dernier accès : 25.01.2024)

Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse, 2024 : Documentation en ligne des modèles météorologiques numériques COSMO : https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/systemes-d-alertes-et-de-previsions/le-systeme-de-prevision-cosmo.html.

Piaget, 1976 : L'évolution orageuse au nord des Alpes et la tornade du Jura Vaudois du 26 août 1971, Publ. 35, SZ ISSN 0080-7346, 102 pp., L'inst. Suisse de Météorol., Payerne, Switzerland, 1976.

Rasmussen, 2003 : Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, **18**, 530–535.

Rasmussen and Blanchard, 1998 : A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, **13**, 1148–1164.

Sturmarchiv. Documentation en ligne : https://www.sturmarchiv.ch/index.php/19260612_01_Tornado_La_Chaux-de-Fonds_NE ; https://www.sturmarchiv.ch/index.php?title=19510618_01_Tornado_Malvilliers_NE (Accès : 26.01.2024)

Thompson, 1998 : Eta Model storm-relative winds associated with tornadic and nontornadic supercells. *Wea. Forecasting*, **13**, 125–137.

Thompson et al., 2003 : Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, **18**, 1243-1261.

Weisman and Klemp, 1982 : The dependence of numerically simulated convective storms on wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev*., **110**, 504–520.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements aux personnes et organisations suivantes pour les données et témoignages fournis sur les dégâts et répercussions de cet orage : **Marc Riedo** (Responsable du SITN), **Michel-Alain Jeanneret** (habitant du Crêt-du-Locle).

Nous remercions par ailleurs les personnes suivantes de MétéoSuisse pour leur contribution ou évaluation du rapport : **Olivier Duding, Oliver Fuhrer**, **Marco Gaia**, **Marianne Giroud, Urs Graf**, **Ulrich Hamann, Alessandro Hering, Élie Kirchner, Adrien Michel, Pamela Probst, Christophe Salamin** et **Christophe Schmutz.**

MeteoSchweiz
Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno Monti
T +41 58 460 97 77
www.meteosvizzera.ch

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2
T +41 58 460 98 88
www.meteosuisse.ch

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérologie
CH-1530 Payerne
T +41 58 460 94 44
www.meteosuisse.ch