

Affaire suivie par : Nicolas GUTHMANN
Téléphone : 04 92 29 48 45
Courriel : nicolas.guthmann@meteo.fr

NOTE DE SYNTHÈSE

Étude sur les variations de QNH

Cette note de synthèse s'articule en 6 parties.

La première partie présente le contexte du projet, la mise en place du groupe de travail et la problématique.

La seconde partie explicite la méthodologie appliquée pour répondre à cette problématique.

La troisième partie présente les résultats et leur interprétation globale.

La quatrième partie propose une analyse météorologique des variations extrêmes de QNH.

La cinquième partie estime les causes de ces mêmes variations.

Enfin, la sixième partie établit la fréquence de fausses alarmes pour différents seuils de variation de QNH.

1 – Contexte

Rappel historique :

Le 23 mai 2022, un Airbus A320 effectuant un vol commercial entre Stockholm/Arlanda et Roissy/Charles de Gaulle connaît un incident grave lors de sa phase d'approche. En raison d'une erreur de QNH (1011 au lieu de 1001hPa) couplée à des conditions météorologiques offrant une visibilité très tardive du sol, l'approche est effectuée sous le plan de descente. L'alarme MSAW est déclenchée. L'équipage interrompt l'approche n'ayant pas acquis les références visuelles après le passage des minima. Du fait de l'altitude erronée, la hauteur minimale atteinte lors de la phase de remise des gaz a été de 6 ft à 0,8 NM (Nautic Miles) de distance par rapport au seuil de piste, qualifiant cet événement de « quasi » CFIT (Controlled Flight Into Terrain).

Le BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses) détermine que l'incident est initialement causé par la transmission d'un QNH erroné entre la tour de contrôle et le pilote de l'appareil. La transmission de cette donnée permet au pilote de réaliser son calage altimétrique et ainsi de déterminer son altitude réelle. Avec une pression qui varie dans les basses couches d'environ 1hPa tous les 30ft sur la verticale, une erreur de 10hPa a engendré une erreur de 300ft (~100m) entre l'altitude réelle de l'appareil et celle à laquelle l'équipage pensait être.

En conséquence, le BEA recommande à l'opérateur que soit mis en place sans délai une procédure permettant de réduire le risque d'erreur de calage altimétrique lors d'approches utilisant la fonction

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

baroVNAV, possiblement avec une vérification du QNH avec une source d'information indépendante comme les informations ATIS lorsque disponibles [Recommandation FRAN-2022-010].

Suite à cet événement, un groupe de travail regroupant plusieurs acteurs de l'industrie et des opérations aériennes a été organisé par la DSAC, avec la participation d'Airbus. Lors de la définition des mitigations (exercice de Bow Tie) permettant de prévenir un tel incident, il est étudié la faisabilité et la pertinence d'installer un système dans les appareils qui donnerait l'alerte en cas de différence trop importante entre le QNH utilisé et généralement rentré par le pilote lors de la préparation de l'approche et la valeur donnée par le contrôle aérien puis entré par le pilote pour caler l'altitude sur les systèmes d'affichage.

Afin d'appréhender les variations naturelles de QNH et ainsi établir à terme un seuil d'alerte adéquat, il est décidé, sur recommandation d'Airbus, d'étudier les variations de QNH sur un pas de temps de 30 minutes, pour prendre compte le temps moyen que met un avion entre le moment de début de descente et le passage de l'altitude de transition.

De plus, une étude sur les variations naturelles observées à un instant donné entre 2 points distants de 250 NM est suggéré pour prendre en compte les déplacements de l'avion entre le début et la fin de la descente.

Appel à Météo France :

Un partenariat est mis en place avec Météo France pour réaliser une étude détaillée sur les données QNH de 2022.

L'objectif est triple :

- Discriminer parmi les variations importantes de QNH celles d'origine météorologique de celles d'origine non naturelle
- Lorsqu'elles sont d'origine naturelle, analyser et déterminer quelle situation météorologique est responsable de ces importantes variations de pression
- Déterminer les probabilités, sur une année, d'avoir des variations (entre deux instants séparés de 30 min d'une part et entre deux points séparés de 250 NM d'autre part) de QNH égales à X, par classe de variation (e.g. X=[1,5-2,5]-[2,5-3,5]-...-[6,5-7,5] hPa), qui pourra être utilisé par les constructeurs aéronautiques pour confirmer la faisabilité d'une telle solution et affiner un seuil d'alerte compatible d'un faible taux de nuisance (à déterminer par le constructeur dans le cadre de l'exercice de certification d'une telle solution).

Dans ce rapport, seules les variations de QNH sur un pas de temps de 30 minutes seront étudiées. Celles sur une distance de 250 NM feront éventuellement l'objet d'une note ultérieure.

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](#)

2 – Méthodologie

Base de données utilisée :

Afin d'étudier les données de QNH, la meilleure base dont nous disposons est celle des messages METARs qui décrivent de manière régulière les conditions météorologiques sur un aéroport. Outre la valeur du QNH, ces messages délivrent des informations (température, vent, temps sensible...) qui seront précieuses pour déterminer les causes des variations importantes de pression.

Pour être la plus large et la plus complète possible, la base de données de départ porte sur l'ensemble des METARs dont nous avons à disposition pour l'année 2022 soit 39683442 METARs représentant près de 3700 aéroports à travers le monde.

Gardons toutefois à l'esprit que de par la répartition de ces aéroports, beaucoup plus nombreux dans les pays industrialisés qu'ailleurs, cette base de données tend à représenter météorologiquement parlant plutôt le climat des moyennes latitudes de l'hémisphère nord.

Si l'insertion d'un QNH dans les messages METARs se veut la norme, notons que cet usage n'est pas systématique pour tous les aéroports. On imagine que certains terrains ne sont peut-être pas équipés d'un capteur de pression. Ces METARs sans QNH n'ayant aucun intérêt pour notre étude, ils ont été éliminés de la base de données, représentant pas moins de 150229 METARs (0,379%).

Bien évidemment, ces plate-formes sans capteur de pression sont des aérodromes locaux, souvent non commerciaux, sans influence pour l'étude qui nous intéresse ici.

Notons aussi que selon les pays le QNH peut être mesuré en hectopascals ou en pouces de mercure. Selon l'unité de mesure choisie, le champ QNH commence par une lettre différente, Q dans le premier cas, A dans le second. Pour les besoins de cette étude, l'unité retenue est l'hectopascal. Tous les METARs donnant des QNH en pouces de mercure ont ainsi été convertis en hectopascals en multipliant sa valeur par 0.338638 puis en arrondissant à l'entier le plus proche.

Limites de l'utilisation de la base de données METARs :

Si la base de données des METARs reste, de par sa syntaxe très stricte, d'une bonne fiabilité, elle a tout de même ses limites de par les pratiques qui sont faites dans chaque service météo national, notamment pour ceux qui les rédigent encore manuellement. De ce fait, les erreurs de codage restent fréquentes.

Pour ces raisons, les METARs suivants ont dû être supprimés de la base de données :

- 56 (0,0001%) du fait d'un indicateur OACI mal codé
- 1501 (0,0038%) du fait d'une date mal codée (en général un caractère manquant ou supplémentaire)
- 1675 (0,0043%) du fait d'un QNH collé au groupe précédent ou suivant
- 1106 (0,0027%) du fait d'une valeur de QNH manifestement aberrante (< à 850hPa ou > à 1090hPa), valeurs correspondant aux extrêmes de pression réduite au niveau de la mer jamais mesurée sur Terre
- 357 (0,0009%) du fait d'un QNH reconnu mais mal codé (ex : Q1014,5)

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](#)

Notons ici que seules les erreurs évidentes ont pu être éliminées ici. Si le rédacteur du METAR a écrit dans son message un indicateur OACI, une date ou un QNH faux mais plausible, ceux-ci n'ont pas pu être supprimés automatiquement.

Panne des capteurs :

Comme tout matériel, le capteur pression d'un aéroport peut être temporairement et parfois durablement en panne.

Ainsi, pour l'année 2022, 72819 METARs (0,184%) sont partis avec le code Q//// ou A//// pour signaler une telle panne.

Ces pannes, dont l'occurrence est loin d'être négligeable, seront un facteur à prendre en compte dans la mise en place d'un système d'alerte puisqu'elles représentent un point bloquant quand elles adviennent.

Fréquence d'émission des METARs :

Si les pratiques de codage des METARs divergent d'un pays à l'autre, c'est aussi le cas de leur fréquence d'émission. En Europe nous sommes habitués aux METARs semi-horaires (cad émis toutes les 30 minutes) mais cette fréquence n'est pas la règle. En effet, la majorité des plate-formes émettent des METARs horaires. A l'inverse, les aéroports commerciaux des États-Unis émettent toutes les 20 minutes. Beaucoup plus rarement, on trouve quelques aérodromes qui émettent toutes les 3 heures.

De la même manière, l'envoi de METAR en continu H24 n'est pas respecté par tous les aéroports. Par exemple, certains terrains n'émettent que pendant leurs heures d'ouverture, qui peut être variable selon le moment de l'année. D'autres n'émettent des METARs que de manière sporadique, probablement selon leur besoin, sans logique apparente.

Pour les besoins de cette étude et afin de garder une base de données cohérente avec les usages des aéroports commerciaux, qui reste le cœur de cette étude, il a été décidé de supprimer de la base de données les aéroports qui n'ont pas émis au moins 50 METARs à un rythme horaire ou inférieur en l'espace d'un mois. En conséquence, 134583 METARs (0,34%) jugés trop sporadiques ont été retirés de la base de données finale, ce qui représente entre 100 et 150 aéroports pour chaque mois de l'année.

Calcul des variations de QNH :

La méthodologie suivante a été utilisée. Pour chaque METAR, on s'intéresse également au METAR précédent émis par ce même aéroport. 4 cas de figure sont possibles :

- S'il y a moins de 10 minutes entre les 2 METARs, on ne fait pas de calcul de variation de QNH. Ce cas de figure est rare et correspond en général à un premier METAR mal codé puis recodé quelques minutes plus tard par un opérateur qui s'est rendu compte de l'erreur
- S'il y a entre 10 et 30 minutes entre les 2 METARs, on retient la valeur absolue de la différence de QNH entre les 2 METARs
- S'il y a entre 30 minutes et 2 heures entre les 2 METARs, on retient la valeur absolue de la différence de QNH entre les 2 METARs multiplié par 30 puis divisé par le pas de temps en minute entre les 2 METARs. Cette valeur est ensuite arrondie à l'entier le plus proche. Cette opération a pour but de normaliser la variation de QNH sur une durée de 30 minutes et ainsi d'harmoniser les résultats.
- S'il y a plus de 2 heures entre les 2 METARs, on ne fait pas de calcul de variation de QNH. L'écart de temps devient trop important pour que le résultat soit représentatif dans le cadre de notre étude.

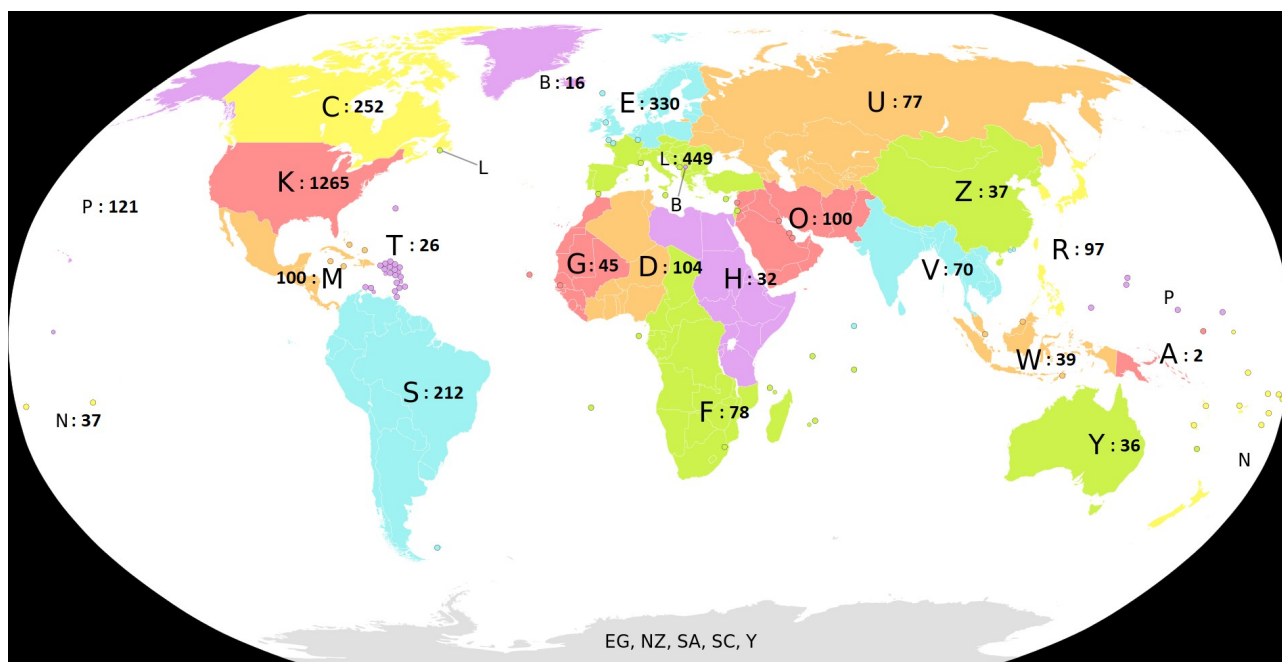
Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](#)

Tableau récapitulatif :

Nb de METARs dans la bdm	39683442	100 %
METARs avec pb d'indicateur OACI	56	0,0001%
METARs avec pb de date	1501	0,0038%
METARs qui n'ont pas de valeur de QNH	150229	0,379%
METARs avec QNH collé au groupe suivant	1290	0,0033%
METARs avec Températures collées au QNH	385	0,0010%
QNH mal codés	357	0,0009%
METARs dont le QNH est à 0	136	0,0003%
METARs avec une valeur qnh positive mais manifestement aberrante	970	0,0024%
METARs avec Q//// ou A//// (capteur en panne)	72819	0,183%
Nb de Metars valide avec QNH	39457373	99,43%
Nb de Metars écartés car trop sporadiques	134583	0,34%
Nb de Metars dans la base finale	39322790	99,09%
Nb de Metars éloigné du précédent de moins de 10min ou plus de 2h	444970	1,12%
Nb de Metars retenu pour calculer une variation de QNH	38877820	97,97%

Répartition des aéroports de l'étude en fonction de la zone OACI :



Comme mentionné plus haut, les aéroports européens et nord-américains sont surreprésentés (~2300) par rapport à ceux du reste du monde (~1200). De ce fait, l'étude sera plutôt le reflet du climat tempéré de l'hémisphère nord.

Météo-France

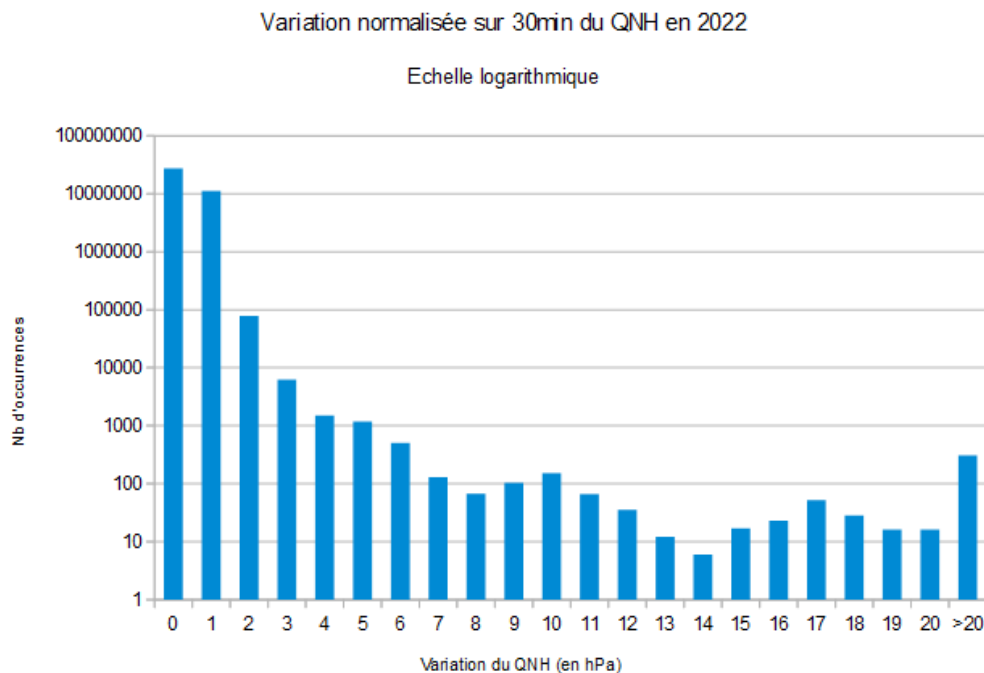
73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

3 – Résultats de l'étude

Le tableau suivant quantifie les variations de QNH ramenées sur 30 minutes à partir des messages METARs de notre base de données finales pour l'année 2022.

Différence de QNH (en hPa)	Nb d'occurrences en 2022	Pourcentage	Pourcentage cumulé
0	27587787	70,96 %	70,96 %
1	11201696	28,81 %	99,77 %
2	77857	0,20 %	99,973 %
3	6251	0,016 %	99,989 %
4	1501	0,004 %	99,993 %
5	1185	0,00305 %	99,996 %
6	505	0,00130 %	99,9973%
7	129	0,00033 %	99,9977%
8	67	0,00017 %	99,9978%
9	103	0,00026 %	99,9981%
10	152	0,00039 %	99,9985%
11	66	0,00017 %	99,99866%
12	35	0,00009 %	99,99875%
13	12	0,00003 %	99,99878%
14	6	0,00002 %	99,99880%
15	17	0,00004 %	99,99884%
16	23	0,00006 %	99,99890%
17	52	0,00013 %	99,99903%
18	28	0,00007 %	99,99910%
19	16	0,00004 %	99,99915%
20	16	0,00004 %	99,99919%
>20	305	0,00078 %	100%
Total	38877820	100,00 %	

Le graphique suivant présente ces mêmes résultats en utilisant une échelle logarithmique.



Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

Analyse :

On observe que le QNH, sur un pas de temps de 30 minutes, est un paramètre d'une très bonne stabilité puisqu'il ne varie qu'au plus d'1hPa dans 99,77% des cas. Cette stabilité est capitale dans notre étude pour la mise en place d'une alerte car elle nous assure de sa fiabilité, sans qu'elle ne soit polluée par de fausses alarmes trop fréquentes pour des raisons naturelles.

En revanche, lorsqu'on avance dans le graphique, après une brusque diminution du nombre d'occurrences lorsqu'on passe de 0 à 3hPa de variation, on observe une relative stabilisation de la décroissance du nombre d'occurrences qui se fait plus lente. Plus surprenant, on observe quelques petits pics centrés autour de 10 et 17hPa.

Si les variations de QNH suivaient entièrement les lois naturelles, on s'attendrait à ce qu'elles suivent des lois statistiques connues, comme la loi normale ou la loi de Gutenberg-Richter qui décrit la variation de magnitude des séismes. Or, autant nous semblons nous approcher de ces lois pour les petites variations de QNH, autant ce n'est plus du tout le cas pour les valeurs extrêmes.

Tentons de comprendre pourquoi.

Erreur humaine :

Comme nous l'avons dit plus haut, bon nombre de pays codent leurs METARs à la main. Ce facteur humain conduit bien évidemment et naturellement à un risque d'erreurs lors de l'écriture du message. Certaines erreurs sautent aux yeux lorsqu'un caractère est manquant ou de trop sur un groupe (une date à 5 ou 7 chiffres par exemple) ou qu'un groupe est collé à un autre (groupe températures collé au groupe QNH). En revanche, il est beaucoup plus difficile à détecter lorsqu'un caractère est remplacé par un autre. De ce fait, il est très probable que ponctuellement des METARs soient envoyés avec des valeurs de QNH fausses. Si l'erreur porte sur le caractère des unités, celle-ci est plus difficilement décelable. Exemple : un METAR qui part avec une valeur de 1013hPa alors que le QNH est en réalité de 1010hPa. Par contre, si l'erreur porte sur le chiffre des dizaines ou des centaines, celle-ci saute plus facilement aux yeux. Et, en effet, le pic centré autour de 10hPa semble confirmer ces erreurs humaines sur le caractère des dizaines. Bien sûr, comme on l'a vu, en plus de l'erreur humaine, la pression a aussi pu varier naturellement entre les 2 METARs. Si on reprend les données plus haut, lorsqu'un opérateur se trompe de 10hPa, l'erreur finale sera effectivement de 10hPa dans 88% des cas mais elle sera de 9 ou 11hPa dans 12% des cas lorsque la variation naturelle de QNH est d'1hPa, 8 ou moins et 12 ou plus dans un nombre de cas quasi négligeable.

Ce phénomène est visible bien entendu uniquement pour les valeurs de QNH qui sont restées brutes, sans transformation, c'est à dire celles données en hPa par des aéroports émettant toutes les 20 et 30 minutes.

Pour les aéroports émettant toutes les heures en hPa, la variation de QNH a été divisée par 2 et les pics devraient donc apparaître autour de 5, 10, 15, 20hPa...

Pour les aéroports émettant en pouces de mercure (mmHg), il faut reconsidérer les QNH dans leur unité d'origine :

_une erreur de 1mmHg entraîne une erreur de 0,34hPa, indétectable

_une erreur de 10mmHg entraîne une erreur de 3,4hPa. Pour les aéroports émettant toutes les 20 ou 30 minutes, cela devrait contribuer à observer un peu plus de valeur à 3 ou 4hPa de différence. Pour ceux émettant toutes les heures, cela correspondrait à une différence de 1 à 2 plus difficilement perceptible.

_une erreur de 100mmHg entraîne une erreur de 34hPa, erreur ramenée à 17hPa pour les aéroports émettant toutes les heures. Et effectivement, un pic est bien observé autour de 17hPa.

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](#)

Essayons de quantifier ces erreurs humaines en reprenant les données brutes et en séparant les METAR AUTO codés par une machine des non AUTO codés potentiellement par un humain :

Différence de QNH (en hPa)	METAR non AUTO 20/30min en hPa	METAR non AUTO 1h en hPa	METAR non AUTO 1h en mmHg	METAR AUTO en hPa	METAR AUTO en mmHg
0	6665564	3044148	3037643	4912765	10866416
1	1699175	2125418	1596331	1323873	2396392
2	12876	98237	83472	15661	125088
3	1095	6870	9183	1287	14406
4	298	1789	1896	254	2814
5	112	695	386	53	671
6	75	401	140	15	176
7	35	258	83	13	49
8	19	209	25	6	20
9	58	326	27	2	11
10	106	526	42	3	10
11	32	260	9	3	8
12	11	85	9	0	1
13	7	43	6	2	0
14	0	22	6	2	0
15	3	19	2	0	0
16	0	8	7	0	0
17	8	11	10	0	0
18	5	13	10	0	1
19	7	11	2	2	0
20	6	17	4	1	0
21	2	10	1	0	1
22	0	16	1	0	0
23	0	11	4	0	1
24	4	7	1	0	0
25	0	1	0	0	0
26	0	0	1	0	0
27	1	2	1	0	0
28	6	2	1	0	0
29	0	2	0	0	0
30	0	6	6	0	0
31	0	4	8	2	0
32	0	6	2	0	0
33	0	5	7	0	0
34	0	4	35	0	0
35	0	5	7	0	3
36	0	2	3	0	1
37	0	1	2	0	2
38	2	1	2	0	1
39	0	1	0	2	0
40	0	3	0	0	1

Nb d'occurrences de variations de QNH par type de METAR

En comparant les variations de QNH des METARs auto des non AUTO, il est flagrant de constater que le nombre d'occurrences des valeurs extrêmes se réduit drastiquement et donc d'observer l'impact du facteur humain dans la justesse des QNH.

Comme attendu, pour les METARs non AUTO qui donne un QNH en hPa, on constate effectivement des pics d'occurrences autour des valeurs 10 et 20hPa correspondant à une erreur sur le chiffre des dizaines.

De même, pour les METARs non AUTO qui donne un QNH en mmHg, un gros pic est observé autour de 34hPa correspondant à une erreur d'une unité sur le chiffre des centaines. On observe également les erreurs sur le chiffre des dizaines avec des pics plus subtils à 3,7, 10, 13, 17, 20, 23, 27, 31 hPa.

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

4 - Analyse météorologique des variations naturelles

Afin de vérifier les possibilités naturelles de brusques variations de QNH, les METARs incriminés dans des variations de QNH supérieures ou égales à 5hPa ramenées sur 30 minutes ont été examinés d'un point de vue météorologique (2365 cas).

Sur cet ensemble, 191 cas (~8%) ont été identifiés comme étant d'origine météorologique répartis sur les variations suivantes :

Différence de QNH (en hPa)	Nb d'occurrences d'origine météorologique
5	127
6	45
7	13
8	1
9	3
10	1
11	1

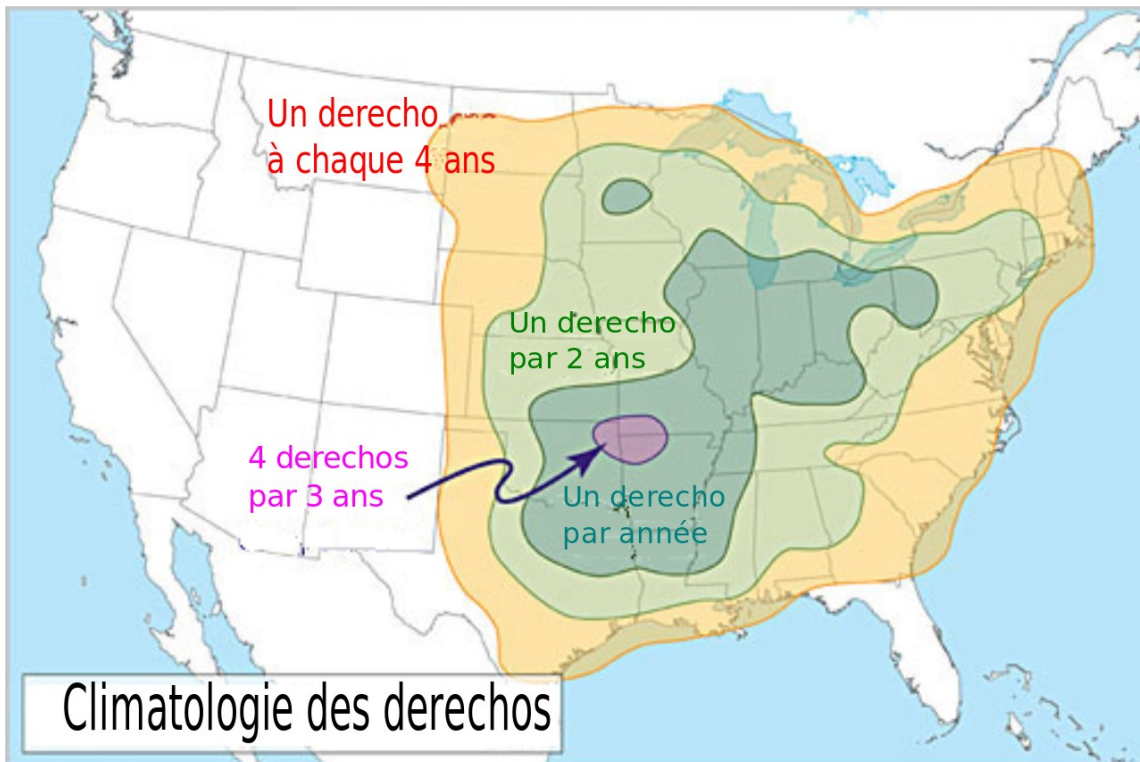
Comme on peut le voir, les extrêmes météorologiques de variation de QNH restent limités en intensité avec un maximum de 11hPa observé en 2022 à l'échelle d'environ 3700 aéroports internationaux.

4 situations météorologiques de différents types ont été observées :

- La première et de loin la plus fréquente (181 cas) est liée à la convection, en particulier lorsqu'elle est organisée en système convectif de méso-échelle, système appelé communément derecho, avec en général présence d'une ligne de grain.

C'est ce type de phénomène qui a frappé la Corse lors de l'épisode du 18 août 2022 qui a fait 12 morts. Le système est né dans les Baléares, a traversé la Méditerranée pour atteindre l'île de Beauté avec des rafales à 225km/h, occasionnant une hausse de pression de 9hPa à Calvi et 11hPa à Ajaccio en 30 minutes. Le système a poursuivi sa route en Italie du Nord, en Slovénie avant de mourir en Autriche après avoir fait de multiples dégâts.

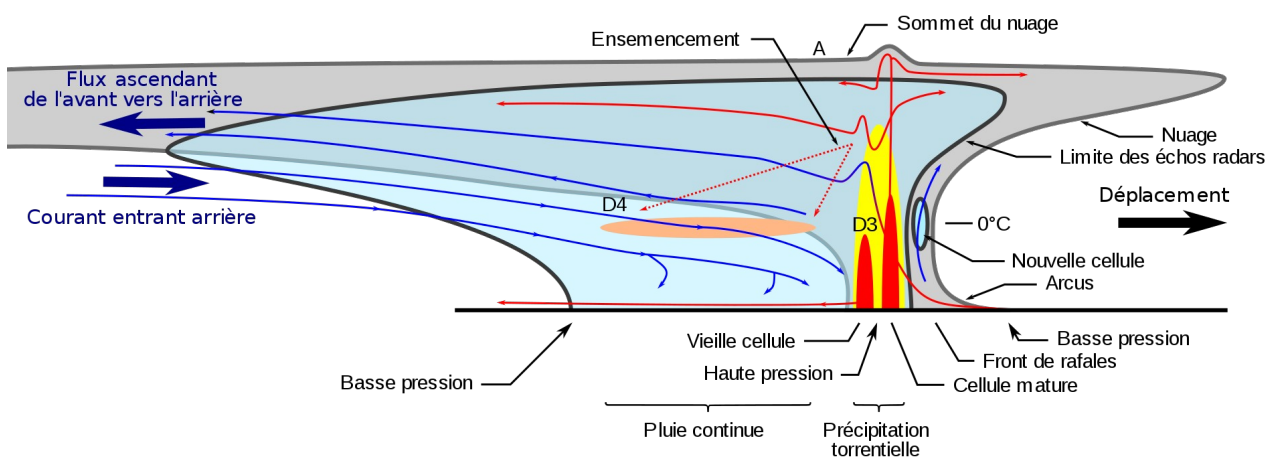
Si la plus intense semble avoir eu lieu en Europe en 2022, ces situations convectives apparaissent le plus fréquemment sur le continent américain notamment dans la zone Midwest avec pas moins d'une douzaine de situations observées en 2022 entre avril et septembre.



Le mécanisme est à chaque fois très similaire avec de l'air chaud dans les basses couches qui remonte depuis les états méridionaux associé à une goutte froide en altitude venue tout droit de la zone Alaska/Canada. En surface, une dépression se creuse vers la frontière canadienne et la convection s'organise au sud de celle-ci sous forme de lignes de grain arquées. Si l'activité la plus intense avec tornades, pluies torrentielles, activité électrique a lieu dans la partie la plus méridionale du système, là où l'air est le plus chaud, ce n'est pas le cas pour les variations de pression. En effet, les variations de QNH les plus importantes ont été observées plutôt dans la partie septentrionale correspondant pour 2022 aux états du Minnesota, du Wisconsin, du Michigan, du Nebraska, de l'Iowa, de l'Illinois ou encore de l'Indiana.

D'une part, on peut observer des hausses brusques de pression lors du passage de la ligne de grain en raison des fortes subsidences qui viennent compresser l'air au niveau du sol.

D'autre part, les baisses de pression peuvent être également très rapides une fois le système passé, d'autant que cette diminution se couple à celle liée au passage de la dépression plus au nord.



Coupe transversale d'un système de type derecho

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

Les données de 2022 montrent que cette variation de pression peut atteindre en général 5/6hPa en 20 minutes avec quelques occurrences à 7/8hPa, le derecho ayant eu lieu en Méditerranée constituant un extrême à priori inégalé en 2022.

Notons que ces situations peuvent également avoir lieu aux saisons intermédiaires sur des zones alors plus méridionales. Par exemple, ce fut 2 fois le cas en mars et novembre 2022. L'air froid pénètre alors plus avant au cœur des Etats Unis et la dépression va venir se creuser sur les états du Sud, au niveau de la Virginie pour ces 2 situations. De même, si les dégâts les plus importants ont été observés en Géorgie et en Caroline du Sud, c'est bien la Caroline du Nord qui a connu les variations de pression les plus importantes.

Précisons que ces systèmes sont capables de se former à peu près partout sur la planète (hors zone polaire). Pour 2022, tous les continents ont été touchés avec des lignes de grain observées en Australie, au Mali, en Ouganda, en Algérie, au Paraguay, en Iran et bien sûr en Europe et Amérique du Nord. D'un METAR à un autre, le signal du passage d'une ligne de grain est souvent très visible avec un renforcement important du vent couplé généralement à un changement significatif de direction, une grosse chute de la température à cause de la descente d'air froid atteignant le sol, une légère augmentation de la température du point de rosée du fait de l'humidité apportée par les précipitations et bien sûr la présence de CB dans les nuages ou de TS dans le temps présent.

Exemple avec l'aéroport de Tebessa en Algérie le 27 août :

DABS 271300Z 10017KT 9999 TS FEW030CB FEW030TCU SCT033 30/12 Q1013=

DABS 271330Z 01031KT 0800 +TSRA FEW030CB SCT030TCU BKN033 14/14 Q1019=

- La deuxième cause météorologique concerne les tempêtes hivernales qui circulent aux moyennes latitudes (4 cas). Elles concernent principalement les mois de janvier et février dans l'hémisphère Nord mais il est très probable qu'elles touchent l'hémisphère Sud comme la pointe de l'Amérique du Sud durant l'hiver austral. Lorsque l'on regarde les variations sur une heure des METARs canadiens, les occurrences à 5/6hPa sont très nombreuses mais n'atteignent plus le seuil dès qu'elles sont ramenées à 30 minutes. Même chose pour le Nord Europe et le Nord Atlantique.

4 cas subsistent malgré tout où les 5hPa en 30 minutes ont été atteints. Il s'agit de tempêtes qui ont à la fois de grandes vitesses de déplacement, un fort gradient de pression et qui sont soit en train de se creuser, soit en train de se combler.

Pour 2022, il s'agit des tempêtes Izzy (14-17 janvier) et Kenan (27-31 janvier) pour le Canada et les Etats-Unis et des tempêtes Malik (28 janvier au 3 février) et Franklin (21 février) pour l'Europe du Nord.

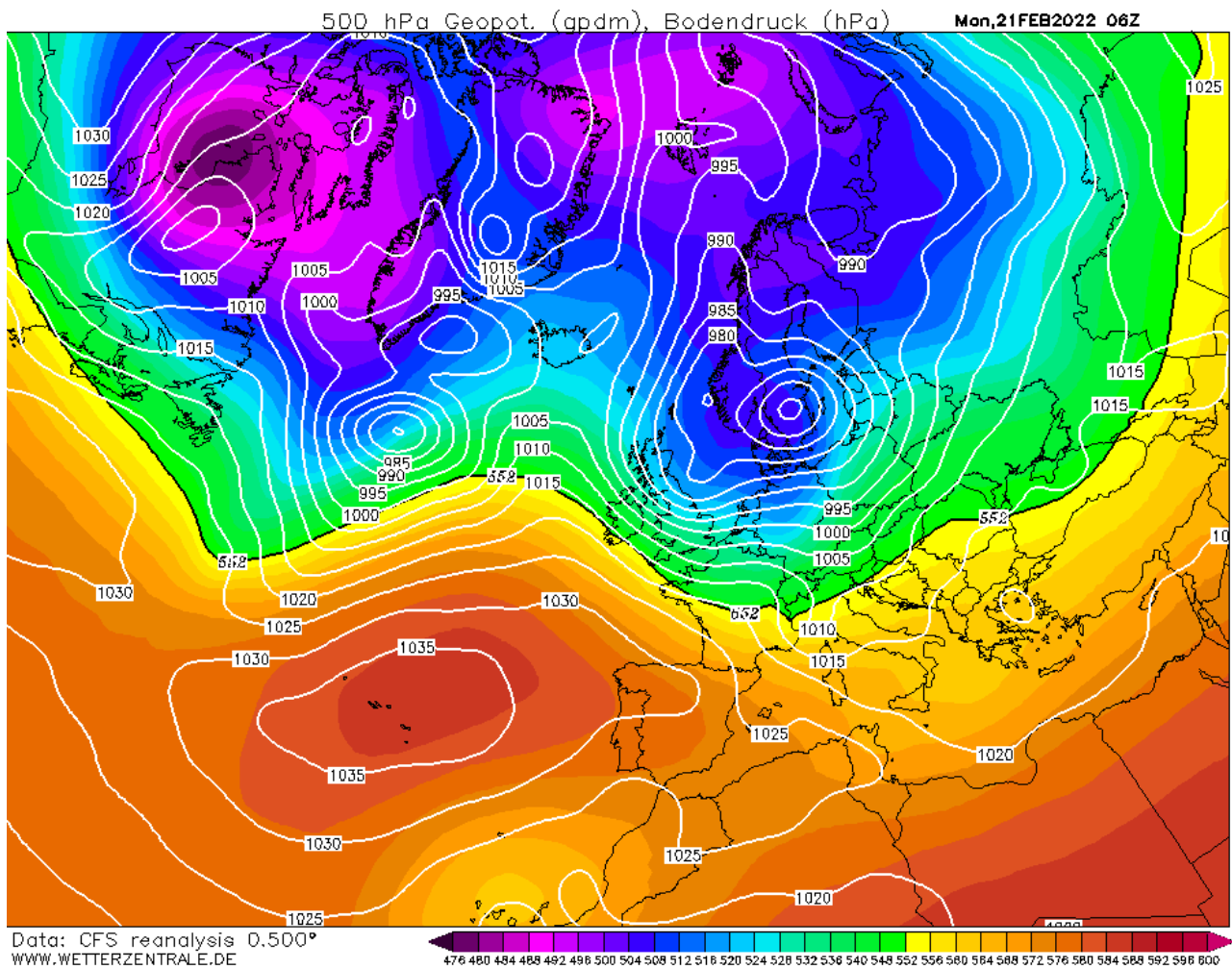


Image Pression Mer et Z500hPa du 21/02/2022 à 6hUTC (modèle GFS reanalysis)

Exemple avec l'aéroport de Stornoway en Ecosse le 30 janvier :

```
EGPO 301820Z AUTO 31056G75KT 2200 RA BKN003/// BKN006/// BKN010/// 05/04 Q0995 REDZ=
EGPO 301850Z AUTO 33044G58KT 5000 -RA SCT006/// OVC011/// 03/03 Q1001 RERA=
```

- La troisième cause concerne les phénomènes de type cyclones tropicaux qui peuvent engendrer eux aussi de brusques variations de pression.

Pour l'année 2022, le meilleur exemple est celui du typhon Hinnamnor qui a traversé le sud du Japon le 30 août, cyclone de catégorie 5 avec des rafales à plus de 250 km/h :

```
RORK 301900Z AUTO 30037G56KT 1000 -RA BR FEW007 OVC010 //CB 27/26 Q0983=
RORK 302000Z AUTO 23068G94KT 0500 // BKN003 OVC007 //CB 27/26 Q0964=
RORK 302100Z AUTO 18059G78KT 0700 -RA FG SCT008 OVC010 //CB 27/27 Q0977=
RORK 302200Z AUTO 14065G80KT 0100 +RA FG FEW003 SCT018 BKN024 //CB 26/26 Q0988=
```

A l'approche du cœur du typhon, on voit que le QNH a pu baisser jusqu'à 19hPa en 1 heure, soit environ 10hPa sur un pas de temps de 30 minutes, avant de remonter d'une dizaine d'hectopascals par heure.

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr @meteofrance

- La quatrième cause est plus exceptionnelle puisqu'un seul cas a été observé en 2022 où la variation de pression a atteint 5hPa en 30 minutes. Il s'agit d'une situation de déferlement qui a touché le nord de l'Italie et l'ex-Yougoslavie le 7 février.

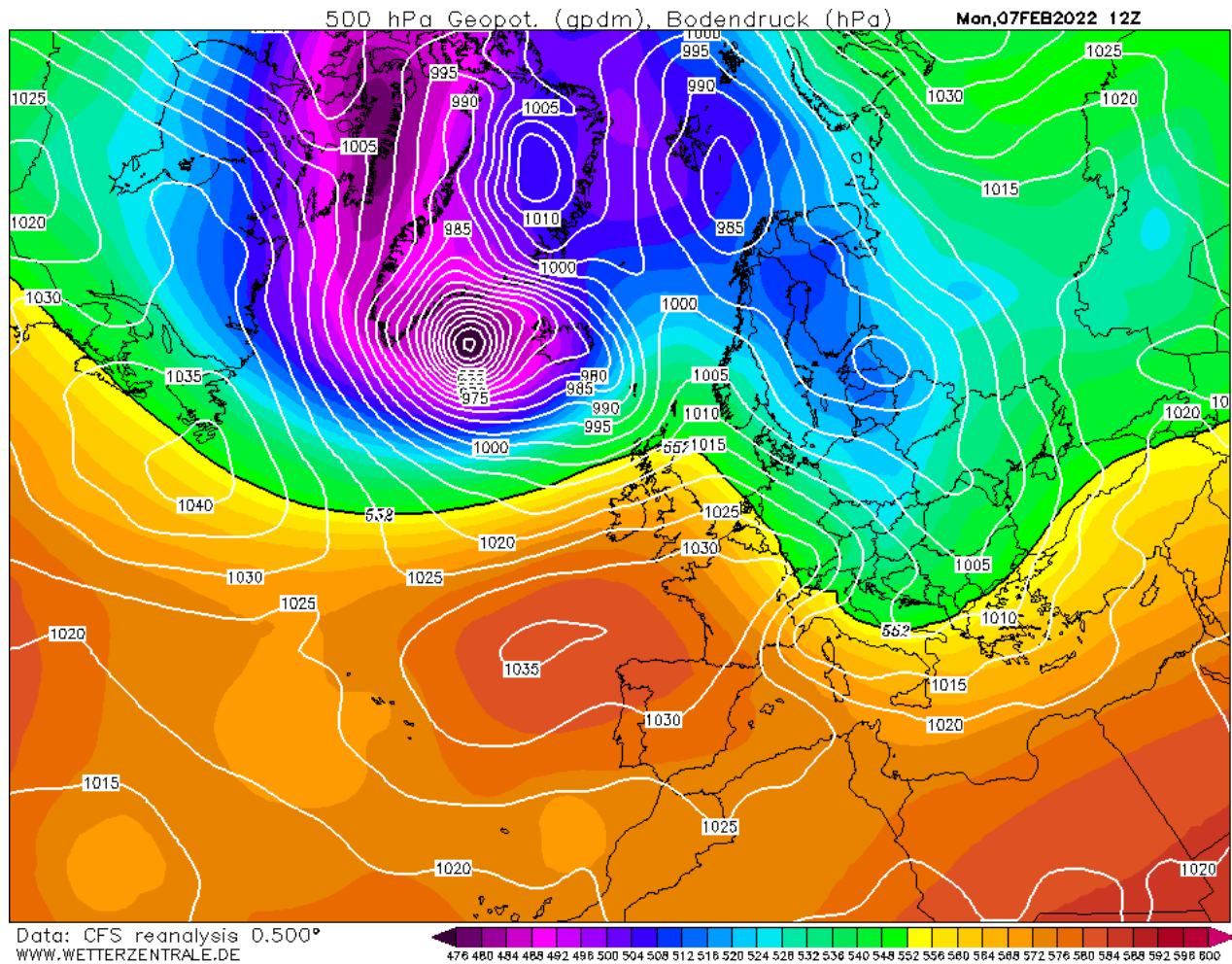


Image Pression Mer et Z500hPa du 07/02/2022 à 12hUTC (modèle GFS reanalysis)

Comme on le voit sur cette carte d'archive, la zone alpine est soumise à un fort gradient de pression généralisé sur toutes les couches. Ce gradient entraîne un fort vent turbulent qui descend des montagnes puis s'écoule sur la plaine du Pô engendrant des déferlements, des rotors, de fortes rafales. De nombreux dégâts sont observés sous ce front de rafales, notamment à Milan, avec une durée de retour que les médias italiens ont estimé à 10 ans.

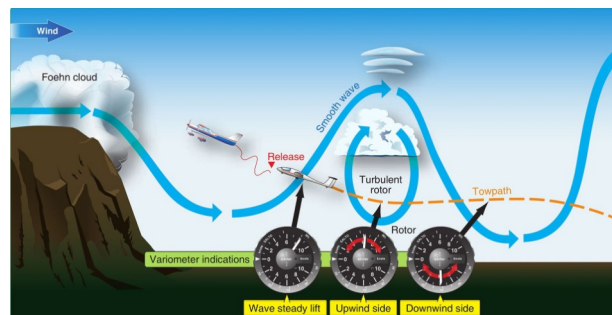


Schéma illustrant la formation de rotors lors d'une situation de déferlement

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr @meteofrance

Exemple avec l'aéroport de Monte Sant'Angelo en Italie :
 LIBE 071455Z 34038G56KT 0000 -RA FG VV/// 01/01 Q1005=
 LIBE 071555Z 34049G72KT 0000 -RA FG VV/// 02/00 Q1001=
 LIBE 071655Z 34045G66KT 9999 OVC012 02/M01 Q1007=
 LIBE 071755Z 36030G42KT 9999 SCT012 01/M03 Q1012=

- Enfin, un dernier cas reste inexpliqué. Il s'est produit en Turquie à Dalaman le 7 avril 2022 :
 LTBS 071450Z VRB04KT 9999 FEW030 BKN100 21/11 Q1006 NOSIG=
 LTBS 071520Z 13018G31KT 9999 FEW030 BKN100 22/10 Q1001 NOSIG=

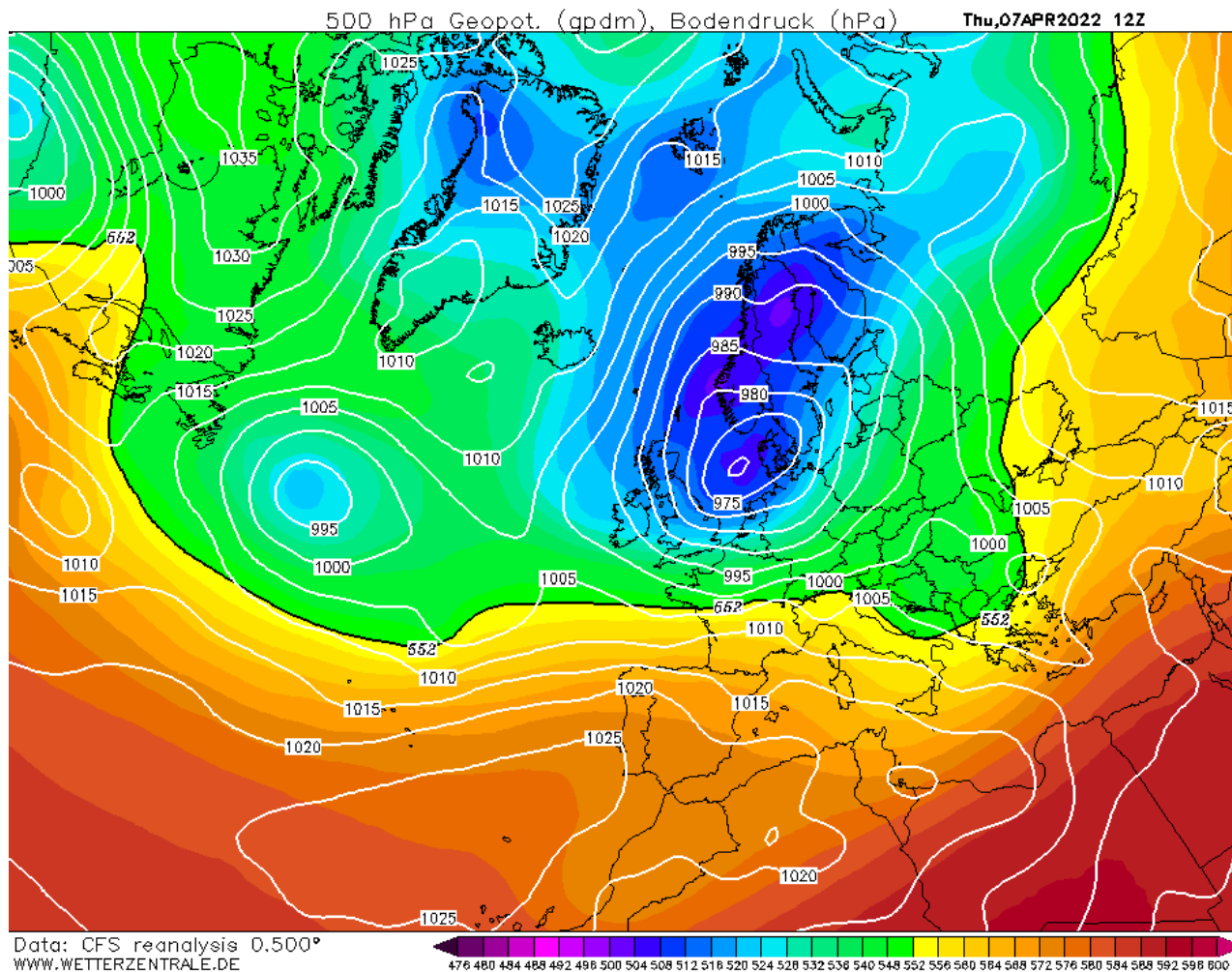


Image Pression Mer et Z500hPa du 07/04/2022 à 12hUTC (modèle GFS reanalysis)

Malgré le renforcement sensible du vent et la présence d'un petit creux dépressionnaire, rien n'explique de manière évidente cette brusque chute de pression.

Cette variation est bien d'origine météorologique car l'aéroport de Rhodes situé juste à l'ouest a subi le même type de variation peu avant.

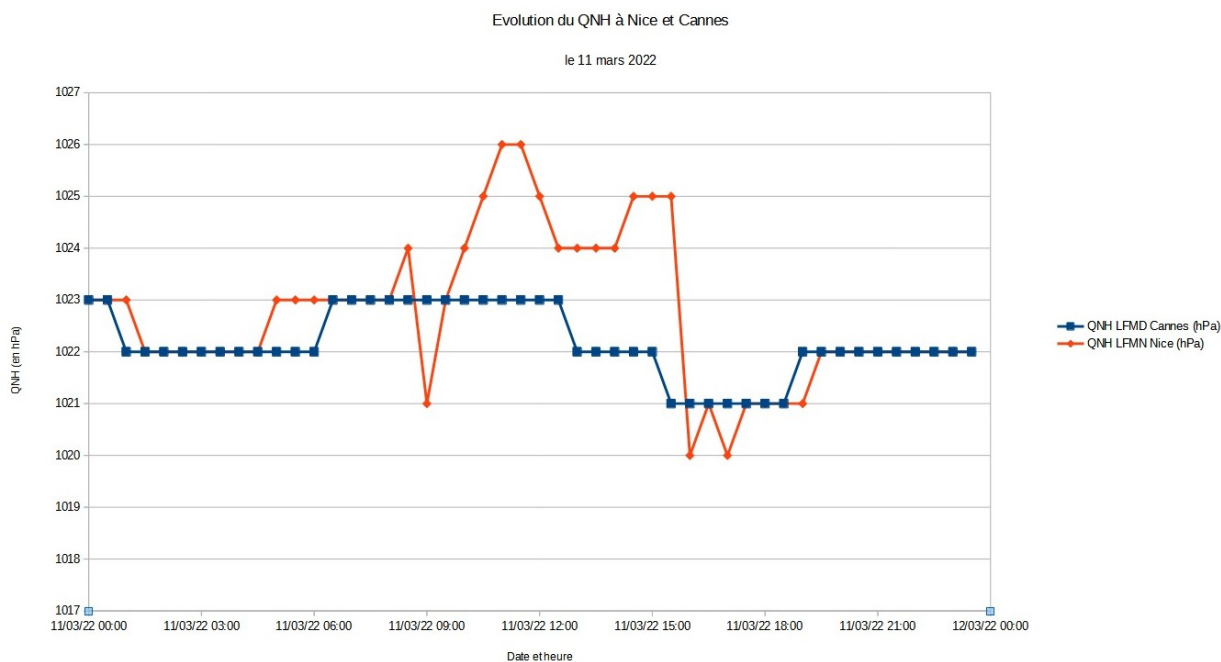
Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
 www.meteofrance.fr @meteofrance

Capteur défaillant :

Outre les variations naturelles et les erreurs humaines, la troisième cause entraînant une variation importante de QNH sur un court laps de temps est une défaillance du capteur pression qui peut donner alors des valeurs de QNH erronées.

En 2022, le cas de figure s'est présenté sur l'aéroport de Nice le 11 mars. À la suite d'une opération de maintenance vers 8hUTC, un bouchon a été oublié sur l'appareil de mesure entraînant une obturation du capteur. Pendant plusieurs heures, la pression délivrée par la sonde est fautive, en général majorée de quelques hectopascals, avant un retour à la normale suite à une nouvelle intervention vers 16hUTC.



On note qu'à l'instar d'une erreur humaine de codage, une mauvaise mesure de la pression sera en général responsable de 2 sauts de pression, le premier quand il surgit, le deuxième quand il se résout, et donc que pour un événement, nous avons en général 2 variations de QNH supérieures à 5hPa.

Les METARs suivants venant de Storm Hills au Canada illustrent ce genre de défaillance de capteur :

```
CWVH 011600Z AUTO 09018KT ///SM OVC013 M15/M17 A3024=  
CWVH 011700Z AUTO 09017G22KT ///SM OVC011 M16/M17 A2593=  
CWVH 011800Z AUTO 09019KT ///SM OVC008 M16/M17 A3023=
```

Il a été établi que ces défaillances ont un taux d'occurrences assez élevé sur les aéroports canadiens¹ (entre 15 et 20 événements par mois à l'échelle de la zone C) avec des variations de QNH très importantes, souvent de l'ordre de plusieurs centaines de mm de Hg.

¹ <https://www.icao.int/safety/meteorology/amofsg/amofsg%20meeting%20material/amofsg.7.sn.023.5.en.doc>

5 - Estimation des variations de QNH selon leur cause

Cause naturelle météorologique :

A partir de l'analyse météorologique que l'on a faite précédemment, on peut estimer en termes d'ordre de grandeur la fréquence d'occurrences des variations de QNH d'origine naturelle lorsque celles-ci atteignent au moins 5 hPa en 30 minutes :

Différence de QNH (en hPa)	Nb d'occurrences totales	Nb d'occurrences d'origine météorologique	Fréquence des occurrences d'origine météorologique
<5	38875092	?	?
>=5	2717	191	0,00000491
>=6	1532	64	0,00000165
>=7	1027	19	0,00000049
>=8	898	6	0,00000015
>=9	831	5	0,00000013
>=10	728	2	0,00000005
>=11	576	1	0,00000003
>=12	510	0	0,00000000
Total	38877809		

Cause capteur défaillant :

Ensuite, pour discriminer les variations importantes de QNH liées à un problème de capteur de celles liées à une erreur humaine, nous allons nous intéresser aux METARs AUTO où l'erreur humaine n'a pas cours. Grâce à la fréquence des occurrences d'origine naturelle que nous avons déterminé précédemment, nous allons pouvoir retrancher celles-ci, nous laissant uniquement une estimation des variations de QNH liées à un problème de capteur.

Comme dit plus haut, pour tout problème de capteur correspond en principe 2 variations importantes de QNH, celle de déclenchement et celle de retour à la normale. Il faudra alors diviser le nombre d'occurrences estimé par 2 pour avoir une estimation de la fréquence d'occurrences d'un capteur donnant une mauvaise valeur de QNH.

Notons que pour cette estimation, nous n'avons pas tenu compte des METARs AUTO de la zone C (Canada). En effet, les capteurs de pression des petits aéroports canadiens ont un défaut connu et documenté (voir plus haut) qui leur fait prendre des valeurs très aberrantes avec une occurrence très largement supérieure à tous les autres aéroports mondiaux. Les intégrer aurait complètement biaisé l'estimation.

Différence de QNH (en hPa)	Nb d'occurrences totales pour les METARs AUTO	Fréquence des occurrences d'origine météorologique	Estimation du nombre d'occurrences d'origine météorologique pour les METARs AUTO	Estimation du nombre d'occurrences liées à un défaut de capteur pour les METARs AUTO	Estimation de la fréquence des occurrences liées à un défaut de capteur
<5	18976116	?	?	?	?
>=5	233	0,00000491	93	140	0,00000368
>=6	93	0,00000165	31	62	0,00000163
>=7	48	0,00000049	9	39	0,00000102
>=8	33	0,00000015	3	30	0,00000079
>=9	30	0,00000013	2	28	0,00000073
>=10	24	0,00000005	1	23	0,00000061
>=11	21	0,00000003	0	21	0,00000054
>=12	19	0,00000000	0	19	0,00000050
Total	18976349				

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

Cause erreur humaine :

Maintenant que l'on a une estimation des fréquences d'occurrences liées à des raisons naturelles et de capteur, on peut déduire une estimation des fréquences d'occurrences liées à une erreur humaine en retranchant l'estimation de ces 2 premières (naturelles et capteur) des données des METARs humains. Comme pour les problèmes de capteur, il faudra là aussi diviser la fréquence d'occurrences des erreurs humaines par 2 comme chaque erreur implique à la fois un déclenchement et un retour à la normale. Cette estimation de la fréquence d'apparition des erreurs humaines ne vaut bien entendu que pour les aéroports émettant des METARs non automatiques.

Différence de QNH (en hPa)	Nb d'occurrences totales METARs non AUTO	Nb d'occurrences D'origine Météorologique	Estimation du nombre d'occurrences liées à un défaut De capteur	Estimation du nombre d'occurrences liées à une erreur humaine	Estimation de la fréquence des occurrences liées À une erreur humaine dans les METARs non AUTO	Estimation de la fréquence des occurrences liées à une erreur humaine Tous METARs
<5	19168876	?	?	?	?	?
>=5	2284	94	141	2049	0,00005343	0,00002635
>=6	1244	32	62	1150	0,00002999	0,00001479
>=7	788	9	39	740	0,00001929	0,00000951
>=8	674	3	30	641	0,00001671	0,00000824
>=9	610	2	28	580	0,00001512	0,00000746
>=10	513	1	23	489	0,00001275	0,00000629
>=11	364	0	21	343	0,00000894	0,00000441
>=12	300	0	19	281	0,00000732	0,00000361
Total	19171160					

Pour ces METARs non automatiques, grâce aux calculs effectués ci-dessus, on peut estimer que 0,0053 % d'entre eux sont émis avec une erreur humaine de QNH supérieure ou égale à 5hPa. Ce pourcentage d'erreur est ramené à 0,0026 % si on considère l'ensemble des METARs de notre base de données.

6 - Détermination d'un seuil

Approche par fréquence d'occurrences

A partir des différentes estimations de fréquences d'occurrences que l'on a pu faire précédemment, il nous est possible d'estimer la fréquence de fausses alarmes pour différents seuils et même de la décliner selon que le METAR ait été envoyé automatiquement ou pas.

Seuil (en hPa)	Fréquence de déclenchement de l'alarme tout METAR	Fréquence de déclenchement de l'alarme METARs AUTO	Fréquence de déclenchement de l'alarme METARs humains
5	0,0035%	0,00086%	0,0062%
6	0,0018%	0,00033%	0,0033%
7	0,0011%	0,00015%	0,0021%
8	0,0009%	0,00009%	0,0018%
9	0,0008%	0,00009%	0,0016%
10	0,0007%	0,00007%	0,0013%
11	0,0005%	0,00006%	0,0010%

Avec les seuils étudiés (entre 5 et 11hPa), on peut estimer que la fréquence de fausses alarmes serait de l'ordre d'une fois sur 100000.

Entre 5 et 7hPa, l'augmentation du seuil d'une unité reste sensiblement significative puisqu'elle permet de diviser le taux d'un facteur 2. Au-dessus de 7hPa, la fréquence diminue à un rythme moindre, n'offrant alors qu'un gain de diminution des fausses alarmes que très relatif.

Comme nous avons conscience qu'une erreur de QNH de 5hPa reste importante en terme de différence d'altitude (~150ft), tentons d'estimer la fréquence de fausses alarmes pour des seuils plus bas grâce à une autre méthode.

Approche par « pas de temps »

Cette méthode se propose d'étudier le pourcentage de chances que l'alarme se déclenche lorsque le commandant de bord rentre son QNH à un instant t.

Elle suppose que la variation de la pression se fait de manière linéaire dans le temps c'est à dire que si la pression est de 1010hPa à 10h et de 1013hPa à 10h30, elle atteint 1011hPa à 10h10 et 1012hPa à 10h20 ce qui est une estimation cohérente et dont la moyenne est globalement vraie pour des variations de pression naturelles.

Ce n'est évidemment plus le cas lorsque des variations importantes de QNH sont dues à une erreur humaine ou de capteur où le saut de pression se fait d'un coup.

Étant donné que les variations naturelles deviennent prépondérantes sur les autres pour de petites variations de QNH, cette méthode sera d'autant plus fiable que l'on travaille sur de petits seuils.

Prenons des exemples avec un seuil qui serait fixé à 3hPa :

1) 2 METARs espacés de 30 minutes, le premier à t1 avec un QNH de 1010hPa, le deuxième à t2 avec 1013hPa. Le seuil de 3hPa en 30 minutes a bien été atteint mais l'alarme ne se serait pas déclenchée sur la globalité de la période. Si un pilote rentre son QNH à t1+15 minutes, avec une variation linéaire, on peut estimer que la pression serait de 1011,5hPa, soit 1,5hPa de plus que le dernier METAR. Le seuil n'est alors pas atteint donc pas d'alarme.

Comme le QNH est une valeur arrondie à l'entier le plus proche, considérons que la pression doit atteindre 1012,5hPa pour avoir un QNH à 1013hPa et donc un seuil atteint. Avec une variation linéaire, les 1012,5hPa sont atteints à t1+25 minutes, moment à partir duquel l'alarme se déclenche. Sur ce créneau de 30 minutes, l'alarme ne se serait déclenchée que lors des 5 dernières minutes.

2) 2 METARs espacés de 30 minutes, le premier à t1 avec un QNH de 1014hPa, le deuxième à t2 avec 1009hPa. Pour atteindre le seuil 3hPa on considère cette fois que la pression doit être descendue à au moins à 1011,5hPa pour avoir un QNH à 1011hPa. Avec une approche linéaire, cette pression est atteinte à t1+15minutes. Cette fois, sur ce créneau de 30 minutes, on aurait eu un déclenchement de l'alarme sur une période de 15 minutes.

3) 2 METARs espacés d'1 heure, le premier à t1 avec un QNH de 1014hPa, le deuxième à t2 avec 1010hPa. La variation de QNH est de 4hPa en 1 heure mais comme on travaille sur un pas de temps de 30 minutes cela revient à 2hPa en 30 minutes. Le seuil n'est pas atteint donc pas d'alarme.

4) 2 METARs espacés d'1 heure, le premier à t1 avec un QNH de 1000hPa, le deuxième à t2 avec 1010hPa. Ici on est bien sur une variation de plus de 3hPa en 30 minutes. L'alarme se serait déclenchée à partir du moment où la pression aurait atteint 1002,5hPa, c'est à dire à t1+15 minutes. Sur ce créneau d'1 heure l'alarme aurait donc été active sur une période de 45 minutes.

De manière générale, lorsque le seuil est atteint, la durée où l'alarme se déclenche entre chaque METAR peut être obtenue par la formule suivante :

$$d = \Delta t * (1 + (1 - 2 * S) / 2 / \Delta P)$$

avec Δt le temps séparant les 2 METARs, S le seuil choisi et ΔP la différence de QNH entre les 2 METARs

Pour chaque aéroport, pour toute l'année 2022, pour un seuil choisi, on compare ainsi chaque METAR avec son précédent et on détermine le temps où l'alarme aurait sonné par rapport au temps séparant les 2 METARs. Il reste ensuite à faire d'un côté la somme de tous ces temps de déclenchement et de l'autre côté la somme de tous les temps séparant chaque METAR entre eux. Le rapport des deux nous permet d'avoir la fréquence de fausses alarmes pour le seuil que l'on a choisi.

$$\text{freq}_{\text{déclenchement}} = \Sigma(\text{temps}_{\text{déclenchement}}) / \Sigma(\text{temps}_{\text{total}})$$

Pour des raisons de comparaison avec la méthode précédente, nous essayerons de déterminer la fréquence de fausses alarmes pour des seuils allant de 1 à 8hPa :

Seuil (en hPa)	Période de déclenchement de l'alarme												
	Janvier 2022	Février 2022	Mars 2022	Avril 2022	Mai 2022	Juin 2022	Juillet 2022	Août 2022	Septembre 2022	Octobre 2022	Novembre 2022	Décembre 2022	Année 2022
1	5	5	6	6	6	7	7	7	7	6	6	6	6
2	547	490	756	880	952	1170	1580	1959	1818	1507	917	723	922
3	6062	6353	6423	6860	5476	7412	8407	9682	8116	8680	7862	6220	7099
4	15116	13974	14173	15112	12152	17051	16289	18163	14728	16530	13750	11870	14680
5	21099	23227	19250	20180	19783	27062	23248	24807	19664	23444	17470	15862	20788
6	35546	43862	34832	32172	34994	45970	37230	43102	32499	41123	26924	25755	35013
7	54181	64042	51934	43586	47935	68361	49423	57987	42626	56915	37917	38552	49390
8	66270	72967	57508	49819	53129	84417	60836	68355	46919	63046	44302	43604	56881

Météo-France

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé CEDEX - France
www.meteofrance.fr [@meteofrance](https://twitter.com/meteofrance)

Pour chaque seuil, le tableau nous donne la période de fausses alarmes mois après mois ainsi que le total sur l'année 2022. Par exemple, pour le seuil 1hPa, en janvier, l'alarme aurait été active 1 minute toutes les 5 minutes. Pour le seuil 4hPa, pour ce même mois, cela n'aurait été qu'une minute toutes les 15116 minutes. Cette représentation mois par mois nous permet de bien nous rendre compte de l'influence de la saison sur les variations de pression. En effet, comme dit au début, la répartition des aéroports à travers le monde retranscrit essentiellement la climatologie de l'Hémisphère Nord. Dans cette hémisphère, les contrastes thermiques étant plus importants durant la saison hivernale, cela entraîne des variations de pression plus importantes durant cette saison. Effectivement, les variations de pression de 1 à 3hPa sur 30 minutes connaissent un pic centré sur les mois de janvier et février et un creux autour de juillet et août. Comme on l'a vu précédemment, les variations de plus de 3hPa en 30 minutes sont plus rares, souvent générées par des phénomènes extrêmes (orages, grosses tempêtes, cyclones...) qui peuvent se produire en toute saison selon la région du globe. Et effectivement, il est plus difficile d'établir une saisonnalité pour ces variations, d'autant plus que les variations naturelles météorologiques de la pression se retrouvent noyées dans notre étude au milieu de celles liées à des erreurs humaines ou de mesure.

Avec la méthode que l'on vient d'utiliser, le tableau de fréquence de fausses alarmes est le suivant :

Seuil (en hPa)	Fréquence de déclenchement de l'alarme tout METAR	
	Approche par pas de temps	Approche par fréquence d'occurrences
1	16,4076%	
2	0,1084%	
3	0,0141%	
4	0,0068%	
5	0,0048%	0,0035%
6	0,0029%	0,0018%
7	0,0020%	0,0011%
8	0,0018%	0,0009%
9		0,0008%
10		0,0007%
11		0,0005%

Avec cette méthode qui nous permet de travailler sur de plus petits seuils, on constate que la fréquence de fausses alarmes serait de 1 pour 6 avec un seuil de 1hPa. Elle tombe à environ 1 pour 1000 pour un seuil à 2hPa et 1 pour 10000 avec 3hPa. Avec la diminution de la prépondérance des variations naturelles à partir de 3hPa, la fréquence s'amenuise beaucoup moins rapidement dès que l'on a passé ce seuil.

Lorsque l'on compare les 2 méthodes utilisées, on constate une similitude dans l'ordre de grandeur des fréquences estimées. Un facteur d'1,5 à 2 subsiste cependant entre les 2 méthodes et celui-ci semble aller en s'agrandissant au fur et à mesure que le seuil augmente.

Comme signalé plus haut, cette différence s'explique par la prépondérance que prennent les grosses variations de QNH (>20hPa) lorsque l'on travaille sur des seuils plus élevés, variations toujours dues à une erreur humaine ou de capteur. En effet, ces variations étant très largement supérieures au seuil choisi, elles impliquent un laps de temps où l'alarme se déclenche quasiment égal à la totalité du temps séparant les 2 METARs, leur donnant un poids considérable dès lors que le nombre d'occurrences de franchissement de seuil est faible.

Pour se le prouver, appliquons la même méthode sans tenir compte des variations de QNH > ou = à 20hPa, voici alors le tableau de fréquence de fausses alarmes :

Seuil (en hPa)	Fréquence de déclenchement de l'alarme tout METAR		
	Approche par pas de temps (tout Δ QNH)	Approche par pas de temps (uniq. Δ QNH < 20hPa)	Approche par fréquence d'occurrences
1	16,4076%	16,4076%	
2	0,1084%	0,1074%	
3	0,0141%	0,0131%	
4	0,0068%	0,0059%	
5	0,0048%	0,0039%	0,0035%
6	0,0029%	0,0019%	0,0018%
7	0,0020%	0,0011%	0,0011%
8	0,0018%	0,0009%	0,0009%
9			0,0008%
10			0,0007%
11			0,0005%

Comme on peut le constater, la non prise en compte des variations extrêmes ne change pas ou peu la fréquence de déclenchement des petits seuils (≤ 3 hPa). En revanche, pour les seuils plus élevés, elle permet de retomber sur les résultats que l'on avait trouvés lors de la première approche dite par fréquence d'occurrences.

Conclusion de l'étude

L'étude que nous venons de mener nous a permis de démontrer que les variations de QNH sur un pas de temps de 30 minutes sont de manière générale faibles, inférieures à 2hPa dans 99,77% des cas. Ainsi, l'idée d'établir une alarme visant à comparer le QNH rentré par le pilote avec celui donné par le dernier METAR semble tout à fait appropriée.

En revanche, quelques limites ont pu être mises en avant.

D'une part, la fiabilité des METARs qui, lorsqu'ils sont rédigés humainement, peuvent contenir plusieurs types d'erreur allant de l'impossibilité de l'exploiter car un groupe a été mal codé à une erreur dans l'écriture du QNH donnant une valeur de pression fausse. L'étude a montré qu'environ 0,0026 % des METARs partaient faux avec une erreur au moins égale à 5hPa à cause d'une erreur de codage humaine, les petites erreurs de QNH inférieures à 5hPa n'ayant pas pu être déterminées.

D'autre part, la fiabilité des capteurs de pression qui peuvent soit être en panne, soit donner des fausses valeurs à cause d'une défaillance. Concernant les pannes, cela représente 0,183% des METARs et implique un système d'alarme non opérationnel le temps de la panne. Pour les défaillances, l'étude a montré qu'elles représentent au moins 0,00037% des METARs (défaillance d'au moins 5hPa) et seront souvent cause de fausses alarmes.

L'étude s'est penchée sur les grandes variations de pression sur 30 minutes pour des causes météorologiques naturelles. Elle a ainsi montré que la convection profonde est le plus souvent responsable de ces fortes variations avec des systèmes de type derecho et ligne de grain. Parmi les autres phénomènes susceptibles de faire varier brusquement la pression, on retrouve les cyclones tropicaux, les tempêtes hivernales ou encore les déferlements de vent depuis un relief. L'étude a établi que la pression n'a jamais varié de plus de 11hPa en 30 minutes en 2022 pour l'ensemble des observations qu'elle a à sa disposition. Bien sûr, il ne s'agit pas là d'un absolu. L'étude étant limitée dans le temps et dans l'espace, il est probable que des variations encore plus importantes pourront être observées sporadiquement.

En résumé, des variations naturelles importantes de QNH en 30 minutes sont possibles :

- lors de la présence de systèmes orageux organisés (majoritairement aux États-Unis mais potentiellement observables partout dans le monde)
- lors de la présence d'un cyclone (zone tropicale, juin à novembre dans l'hémisphère Nord, novembre à mai dans l'hémisphère Sud)
- lors de passage des tempêtes hivernales (aéroports > à 50° de latitude)
- lors des situations de fort vent sur le relief (aéroports de montagne ou à proximité d'un massif montagneux)

Si ces variations importantes de QNH sont parfois naturelles, gardons en tête qu'elles sont majoritairement causées par une erreur humaine ou un défaut de capteur. Nous recommandons donc de toujours lever le doute quand une valeur de QNH semble anormale.

Enfin, l'étude s'est concentrée sur l'établissement d'un seuil de déclenchement de l'alarme. Elle a ainsi pu estimer que le taux de fausses alarmes serait d'environ 1 pour 1000 avec un seuil fixé à 2hPa, à 1 pour 10000 avec un seuil fixé à 3/4hPa et à 1 pour 100000 avec un seuil à 7/8hPa.

Ici, il nous paraît important de souligner que ces fréquences ont été établies grâce à l'ensemble des aéroports de la base de données. Nous rappelons que cette base inclut des aéroports pas ou peu commerciaux où les METARs sont plus sporadiques, souvent codés humainement et avec potentiellement des capteurs pression de moindre qualité. Pour ces raisons, étant donné que l'alarme sera utilisée très majoritairement pour des atterrissages sur des plate-formes de pointe avec beaucoup de mouvements, il est très probable que la fréquence de fausses alarmes observée réellement soit légèrement inférieure à celle

Météo-France

estimée par l'étude, grâce à une réduction des erreurs humaines ou de capteur sur de tels aéroports. Par ailleurs, la limite de ces taux de fausses alarmes est essentiellement liée à l'utilisation des METARs comme base de comparaison avec le QNH entré par le pilote plutôt que pour des raisons de variations naturelles de pression. En effet, cette limite reflète en grande partie la limite de fiabilité des METARs. Plutôt que d'utiliser ces messages, une piste d'amélioration pourrait consister à comparer le QNH entré par le pilote directement avec celui mesuré par le capteur pression de l'aéroport concerné si tant est qu'une telle procédure technique puisse être réalisée.

Remerciements

Je tiens à remercier

N. Delaunay (DSM/AERO/DA) pour m'avoir mis en relation avec ce projet

M.-F. Delansorne (DSM/AERO/CRA NICE/D) et F. Lannoy (DSM/AERO/CRA NICE/DA) pour m'avoir permis de travailler sur cette étude en me dégageant le temps nécessaire

le GT Altimétrie et en particulier A. Vernay et C. Descheemaeker pour toutes les infos qu'ils m'ont donné pour mener cette étude à bien

B. Ballet (DSM/AERO/RIO) pour m'avoir transmis toutes les données dont j'ai eu besoin

Q. Guiet (DSM/AERO/CC) pour sa relecture de l'étude et l'à-propos des modifications apportées