



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# Ébauche d'une méthodologie d'utilisation de prévisions d'ensemble dans les décisions de vigilance

*Alain Joly, Arnaud Mounier,  
avec le concours des collègues  
qui améliorent les systèmes de prévision numérique,  
qui font avancer l'utilisation des ensembles*

*Météo-France, 2007–2026*

sous licence Creative Commons  CC BY-NC-ND 4.0



# Sur les enjeux des alertes

---

- ▶ il existe quelques études qui comparent les coûts et les « bénéfiques » de systèmes d'alertes environnementales ;
- ▶ l'accent du présent exposé est sur l'**anticipation** dans les alertes ;
- ▶ Schröter *et al.* (2008) étudient deux bassins versants face à l'aléa inondation :
  - ▶ sur un bassin à réponse rapide, *une économie de 0(4) millions € résulte de chaque heure* gagnée pour lancer une alerte ;
  - ▶ sur un grand bassin, *1 h gagnée permet d'économiser 0(30) millions €* ;
  - ▶ les coûts des actions de protection sont respectivement **20 fois et 250 fois moins** élevés ;
- ▶ **Bien noter que c'est la bonne mise en œuvre de toute le chaine d'alerte qui permet d'en retirer les bénéfices socio-économiques.**

# Points de terminologie

---

- ▶ une prévision numérique produite par *un élément d'un ensemble*, s'appelle aussi ***une trajectoire*** ;
- ▶ *tous les éléments d'une prévision d'ensemble sont aussi « déterministes » les uns que les autres*, pourvu que le système d'équations le soit ;
- ▶ on ne devrait donc plus qualifier un élément particulier de « prévision déterministe » ;
- ▶ on pourrait parler de *prévision de référence* ;
- ▶ elle est définie comme *la version du système de prévision qui bénéficie des réglages, paramètres, options qui donnent les meilleurs scores sur de longues périodes, sur tout le domaine* ;
- ▶ sur un domaine plus petit, un cas, quelques jours, le CEPMMT a montré de longue date ***qu'un ou plusieurs autres éléments de l'ensemble font mieux*** que la prévision de référence.

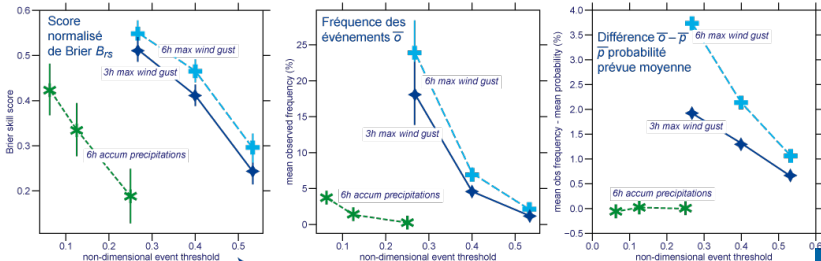
## *Lancer une alerte est un problème de décision*

- ▶ il existe plusieurs cadres dans lesquels s'inscrire :
- ▶ l'approche *rationnelle* ;
- ▶ qui peut être poussée jusqu'à l'approche *quantitative* ou *statistique*.

# Difficultés et limites d'une approche statistique

- ▶ soit  $\mathcal{E}$  un événement défini par un ou des seuils.  
Il survient, c'est une observation  $o = 1$ . Rien n'arrive,  $o = 0$ ;
- ▶ soit un système de prévision. Il donne, à différentes échéances, des probabilités prévues  $p$  que  $\mathcal{E}$  se produise ;
- ▶ **on lance l'alerte dès lors que  $p > p_{\text{dec}} \cdot p_{\text{dec}}$  est la probabilité de décision** ;
- ▶  $p_{\text{dec}}$  provient de l'optimisation d'une fonctionnelle sur une série de couples  $(o, p)$  ;
- ▶ l'intérêt du résultat dépend de nombreux paramètres. On retient :
- ▶ une mesure de qualité, le *score de Brier normalisé*  $\mathcal{B}_S$  ;
- ▶ la *fréquence de l'événement*  $\bar{o}$  et la *probabilité moyenne prévue*  $\bar{p}$  ;

PEArome properties of 03UTC forecasts from 01/06/2024 (3h max wind gusts) or 18/10/2024 to 31/05/2025 averaged over forecast range

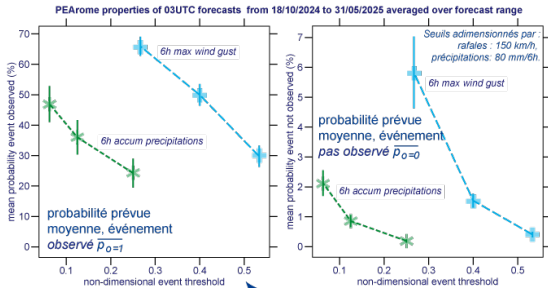


données numériques fournies par F. Stoop et COMPAS/COM

# Difficultés et limites d'une approche statistique

- ▶ une propriété très recherchée est la **fiabilité** :  
*ℰ survient à la fréquence p quand p est prévue ;*
- ▶ mais même avec un **système fiable**, la rareté de ℰ complique les choses ;
- ▶ la fiabilité conduit à  $\bar{p} = \bar{o}$  et  $\text{Var}(p) = \sigma_p^2 = \bar{o}(1 - \bar{o})\mathcal{B}_s$  ;
- ▶ on déduit de l'inégalité  $\text{Prob}[|p - \bar{o}| \geq a] \leq \sigma_p^2/a^2$  avec  $a = 1 - \varepsilon - \bar{o}$ ,  $\bar{o} \ll 1$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$  :  

$$\text{Prob}[|p - \bar{o}| \geq 1 - \varepsilon - \bar{o}] \leq \sim \bar{o}\mathcal{B}_s$$
- ▶ sans la fiabilité, *on ne sait ce que vaut une prévision de p ;*
- ▶ les cas les plus intenses, les plus rares, sont trop peu nombreux pour établir la fiabilité.



données numériques  
 fournies par F. Stoop et  
 COMPAS/COM

- ▶ les cas les plus intenses, les plus rares, **resteront prévus par quelques éléments de l'ensemble** seulement.

# Prise de décision en situation d'urgence

---

*Il s'agit des décisions prises dans les conditions suivantes :*

- ▶ le **temps est limité** ;
- ▶ les **enjeux sont gros**, les véritables décideurs sont **expérimentés** ;
- ▶ les **informations** sont **manquantes, ambiguës, lacunaires**, bref **incertaines** ;
- ▶ les buts sont **peu clairs** au départ, dans un contexte où des **objectifs plus larges** doivent aussi être atteints, les **procédures sont ouvertes** ;
- ▶ des **signes avant-coureurs**, dont on a fait **l'apprentissage**, doivent être reconnus ;
- ▶ en présence de **conditions dynamiques** ou **de situations en évolution** ;
- ▶ le cas échéant, **en équipe**.

# Prise de décision en situation d'urgence

*Le modèle de décision informé/amorcé par la reconnaissance (de forme, de concepts)*

Vivre la situation dans un contexte en évolution

à travers simulations numériques, observations

plus de données

Diagnostiquer

[identifier des caractéristiques]

[construire un scénario]

non

Situation typique ou non ?

[Prototype ou Analogue]

oui

clarifier

inférer, déduire

Anomalie(s)

*Boucle d'identification, de suivi, d'évaluation de scénarios de ce qui peut arriver*

La reconnaissance procure 4 sous-produits

Attentes

[simulation mentale]

Signes avant-coureurs pertinents

Étapes plausibles, instants critiques

Action 1 ... n

Identifier, ajuster l'alerte pertinente

oui

si alerte déjà en cours, faut-il la réviser ?

non

Mettre en œuvre/poursuivre la procédure d'alerte

*adapté de Klein (1999), How people make decisions*

*Boucle de décision sur les actions à mettre en œuvre pour résoudre un problème, ici pour avertir d'un futur problème (décision de lancer une alerte)*

# La prévisibilité, un sujet de Physique

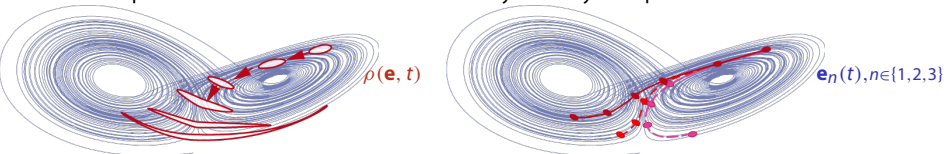
Etudier, comprendre, utiliser la prévisibilité **n'implique pas** d'abandonner toute Physique pour la Statistique.

La plupart des processus naturels se caractérisent par une **immense variabilité**. Leur représentation mathématique et numérique actuelle **rend de mieux en mieux compte de cette variabilité**.

S'en tenir à **une** trajectoire tourne le dos à ces réalités.

Il est bon d'avoir en tête des représentations simples des notions *d'espace des phases ou des variables d'état*, des *cycles limites*, des *attracteurs* et de leurs principales propriétés topologiques, etc. **La prévision d'ensemble est le moyen actuel d'approcher ces objets.**

On dispose de **deux visions** de l'évolution d'un système dynamique :



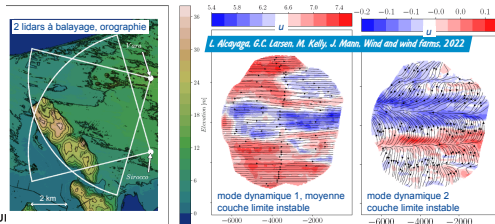
L'étude des systèmes dynamiques associée à la physique statistique fournissent des résultats, des concepts et *une boîte à outils*. Elle reste encore *trop peu utilisée en météorologie et climat*, alors qu'elle est *de plain-pied avec l'ère des données*.

- ▶ *théorème de Mori-Zwanzig*, pour couper une variable d'état en 2 ;
- ▶ *opérateurs de Perron-Frobenius*, sur les « densités » ;
- ▶ *opérateurs de Koopman*, sur les trajectoires.

# La prévisibilité, un sujet de Physique

## Accéder à des propriétés des trajectoires, des attracteurs : les opérateurs de Koopman

- ▶ un opérateur **linéaire** gouvernant l'évolution d'un **observable** le long *de trajectoires d'un système dynamique non-linéaire* ;
- ▶ conçu comme moyen **d'extraire des structures cohérentes** avec leur évolution temporelle ;
- ▶ permet d'approcher un attracteur *avec des moyens de l'analyse linéaire : spectre, modes, décomposition/reconstruction*
- ▶ **mais en prêtant attention à la dynamique d'évolution**, plutôt qu'aux conditions moyennes ;
- ▶ les « *modes dynamiques* » décomposant les opérateurs :
  - ▶ **ne sont pas orthogonaux**, ont plus de sens physique ;
  - ▶ ils sont *dynamiquement invariants* ;
  - ▶ ils se déduisent des corrélations croisées entre états à plusieurs instants.



Un exemple d'extraction de modes dynamiques n'utilisant que des observations de vent par lidars au sol.

# A partir de là...

---

- ▶ les *décisions de vigilance* restent *humaines* ;
- ▶ elles se prennent dans le cadre (non statistique) *des décisions en situations d'urgence, de crise* ;
- ▶ elles utilisent *les prévisions d'ensemble* comme *une collection de trajectoires* ;
- ▶ elles considèrent que chaque trajectoire donnée par l'ensemble est ***une évolution possible***.

# Vers une méthode centrée sur les ensembles

**Ébauche de méthodologie** : *juste une base de début de concertation.*

**3 lignes de force** :

- ▶ *commencer* par explorer le contenu des ensembles ;
- ▶ étudier *quelques trajectoires* au moyen d'analyses conceptuelles ;
- ▶ gérer un jeu de *quelques scénarios* (au lieu d'un seul).

Cette approche ne demande pas de nouveaux savoir-faire. *Elle capitalise sur le savoir-faire actuel en physique de l'atmosphère, modèles conceptuels, etc.*

Elle est fondée *sur la prise de décision en situation d'urgence, de crise.*

# Méthodologie : phase d'expertisation

étape 0: *rapel du scénario de référence et des alternatives*

étape 1: *étudier les synthèses  
du contenu du/des ensembles*

*par aléas, enjeux de vigilance*

**clik 1**

*ou par phénomènes*

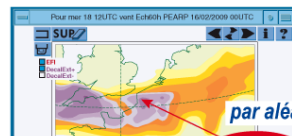
**clik 1**

étape 2: *en 1 ou 2 clics au plus,  
passer des synthèses à quelques  
trajectoires individuelles  
représentatives*

**clik 2**

étape 3: *étudier ces trajectoires avec  
les moyens habituels d'expertise :  
modèles conceptuels, critique des conditions  
initiales, biais connus, etc*

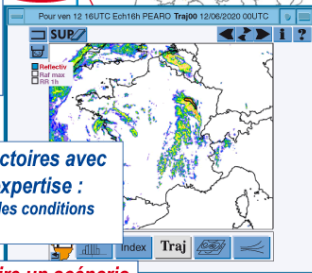
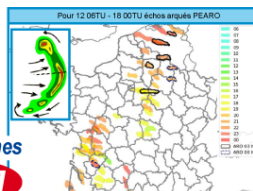
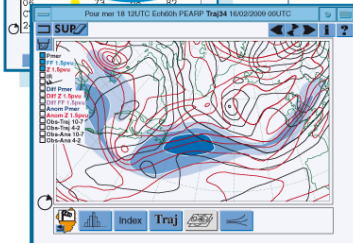
étape 4: *écarter ou en faire un scénario*



Pour mer 18 PEARP VIGILANCE J+2 15/10/2009 03UTC

Param:  EFI: 92.  
Région: Haute-Normandie DecalExt: 0.26

Traj	vig	Q(F10)	Q(RF10)	Q(RF500)
04	87	96	89	
05	82	95	98	
13				
29				
06	73		82	



# Méthodologie : phase de gestion des scénarios

jeu de scénarios à l'instant  $t$

**scénario 1 - référence**  
*le plus probable compte-tenu  
des informations disponibles*

**scénario 2**  
*alternative à surveiller,  
instants critiques identifiés*

**scénario 3**

**scénario 4**  
*semblant moins probable*

événements poussant à réviser le jeu

suivi continu des observations

sortie d'une nouvelle réalisation  
de prévision d'ensemble

la plage horaire d'un instant critique  
d'un scénario est atteinte

décisions de révision possibles

l'analyse précédente reste juste

une caractéristique d'un scénario alternatif  
s'affirme, se matérialise

une caractéristique s'efface

jeu de scénarios à l'instant  $t + \Delta t$

**scénario 2**  
*devient la référence*

**scénario 1**

**scénario 4**

**nouveau scénario**

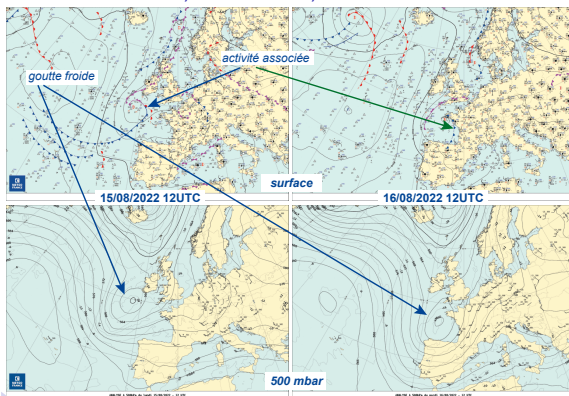
**scénario 3**  
*peut être exclu du jeu*

**un nouveau scénario**  
*peut être incorporé au jeu  
existant, variante d'un autre ou très différent*

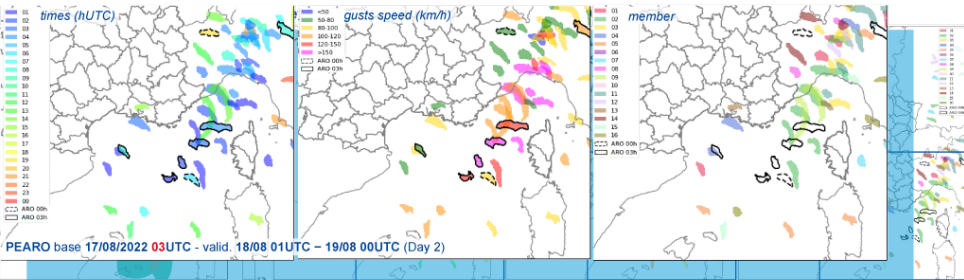
# Un cas parcouru en simulant la méthodologie

## Quelques remarques liminaires :

- ▶ les données numériques utilisées ont *toutes été produites en temps réel (PEARO opérationnelle) ou quasi-réel* ;
- ▶ il ne s'agit **pas** :
  - ▶ de revenir sur ce qui a été fait,
  - ▶ de dire ce qu'il aurait fallu faire,
  - ▶ ni même de dire voilà comment faire,
- ▶ à la manière de G. Klein, il s'agit de **de raconter une histoire faisant vivre la méthodologie dans une situation typique** ;
- ▶ typique car *d'échelle convective, très incertaine, aux aléas très rares.*



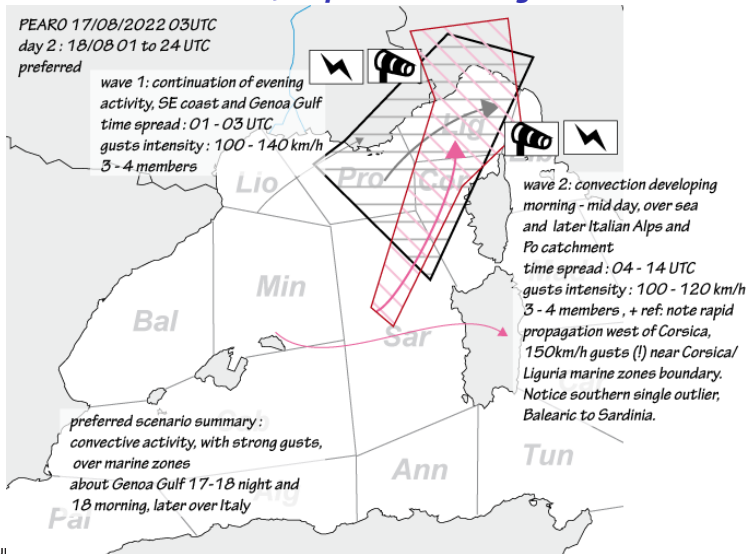
# Cartes de synthèse, aléas vents forts convectifs



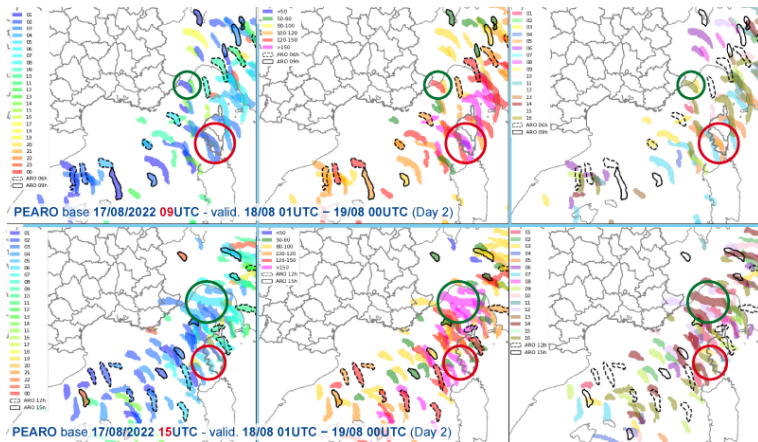
*A. Mounier, L. Raynaud, L. Rottner, M. Plu, Ph. Arbogast, M. Kreitz, L. Mignan, B. Touzé (2022)  
Détection des échos arqués dans des prévisions d'échelle kilométrique par réseau de neurones*

# Scénario : ébauche graphique et commentaires

## Scénario de référence, risques vent et orages en Méditerranée



# Cartes de synthèse, aléas vents forts convectifs



# Scénario alternatif, ébauche graphique

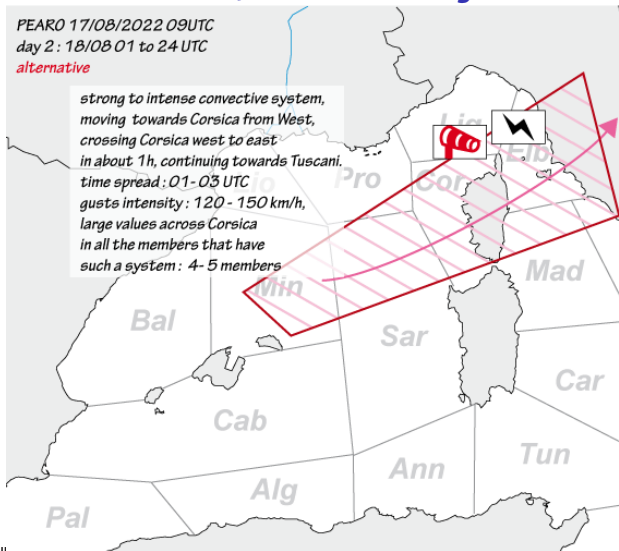
## Scénario alternatif, aléas vent et orages touchant la Corse

PEARO 17/08/2022 09UTC

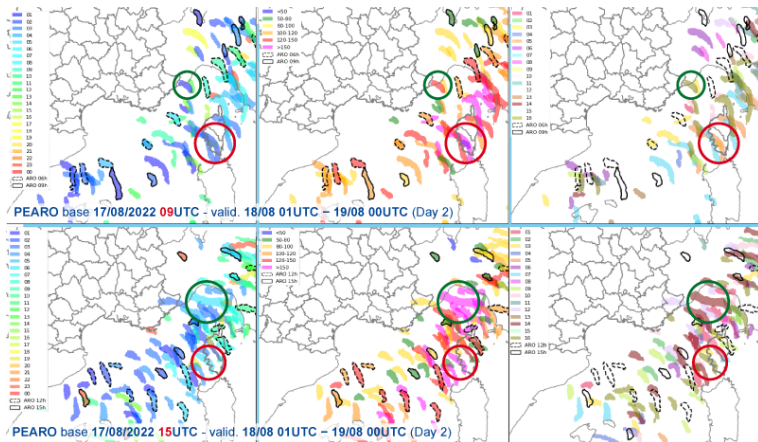
day 2 : 18/08 01 to 24 UTC

*alternative*

*strong to intense convective system,  
moving towards Corsica from West,  
crossing Corsica west to east  
in about 1h, continuing towards Tuscani.  
time spread : 01-03 UTC  
gusts intensity : 120 - 150 km/h,  
large values across Corsica  
in all the members that have  
such a system : 4-5 members*

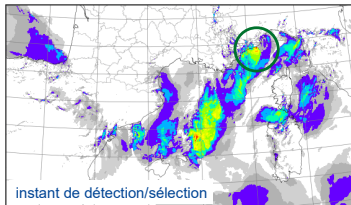


# Cartes de synthèse, aléas vents forts convectifs

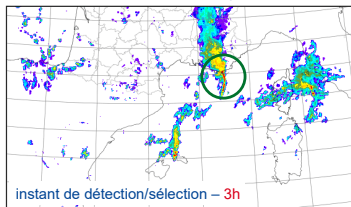


# Scénario de référence : une trajectoire

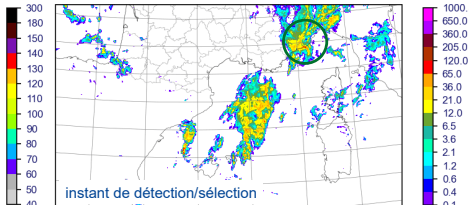
PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 01TU (+16h)  
rafales max à 10m / max wind gusts at 10 m - km/h



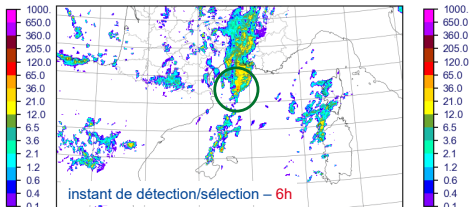
PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 17/08/2022 22TU (+13h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 01TU (+16h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



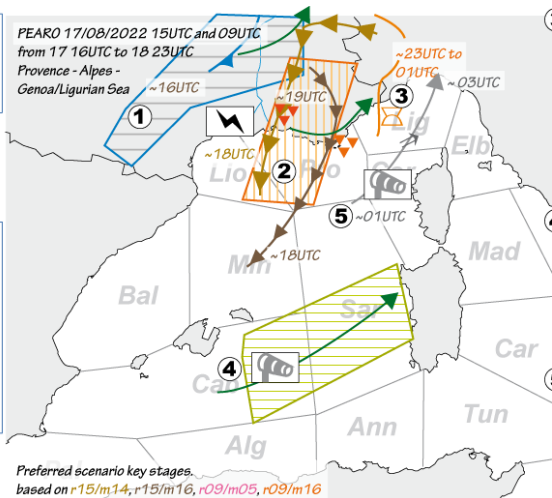
PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 17/08/2022 19TU (+10h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



# Scenario de référence : points de rendez-vous

- 1** Front-like organization, variable southern extension, moving NE end afternoon, early evening. Leaves area by the North in r15/m14 and r09/m05.

PEARO 17/08/2022 15UTC and 09UTC  
from 17 16UTC to 18 23UTC  
Provence - Alpes -  
Genoa/Ligurian Sea



- 3** Convective activity moves eastward following coast.   
 ▽ heavier precipitations in r09/m16 about 22UTC. When reaching Genoa area, activity dies away.

- 2** Line convection, forming 17th afternoon from sea, extends to N, moves ENE. Complex association with front-like in r15/m16, seemingly independent in r15/m14, merged as southern part of front-like in r09/m16, absent in r09/m05.   
 ▽ locates precipitation rate peak in both r15/m14, r15/m16

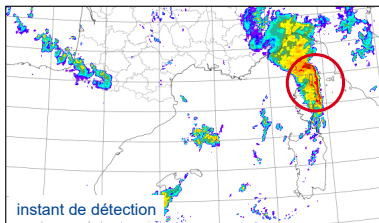
- 4** From 16UTC to ~20UTC area of ~90 km/h gusts dying away in 15UTC runs. 18th afternoon activity weak over all area.

- 5** Note: possibility of strong squall, gusts > 120 km/h, in r15/m12. indication limited to bow echo summary maps: full life-cycle not analyzed.

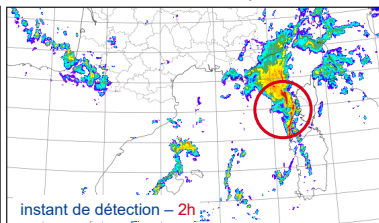
Preferred scenario key stages.  
based on r15/m14, r15/m16, r09/m05, r09/m16

# Une surprise dans cette même trajectoire

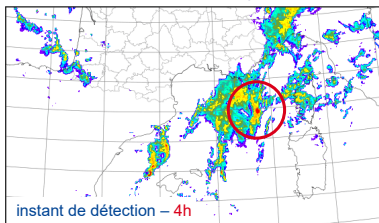
PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 06TU (+21h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



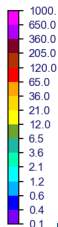
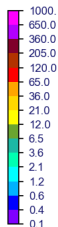
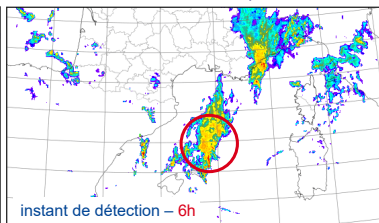
PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 04TU (+19h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 02TU (+17h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h



PEARO m16 base 17/08/2022 09TU val 18/08/2022 00TU (+15h)  
réflectivité max / max reflectivity - mm/h

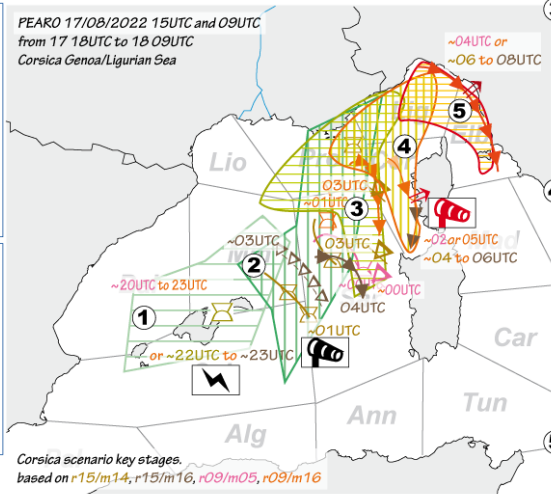


# Scenario alternatif : points de rendez-vous

**1** Convective activity arises about Balearic archipelago late afternoon of 17th. Mostly new cells, no well defined structures, does spread spatially. r15/m16 and r09/m16 extend towards NE in relation to older coastal activity. This extension seems independent in other trajectories. At indicated times, strong cells are present. Time spread reduced in r15 relative to r09.

**2** Convection begins a definite NE motion, spatial spreading suggests cluster organization, squall lines forms. Squall lines mostly in southern part. Gusts locally reaching 120 km/h close to lines. Lines moving away from radar networks, but some cells have very cold cloud tops that show in brightness temperatures.

PEARO 17/08/2022 15UTC and 09UTC  
from 17 18UTC to 18 09UTC  
Corsica Genoa/Ligurian Sea



**3** Line structures amplify on the front part of cluster. Southern part bends cyclonically. Gusts locally above 130 km/h. North-eastward motion accelerates. The maximum gust wind field of r15/m14 over 02 to 03UTC shows NE motion speed reaching ~100km/h.

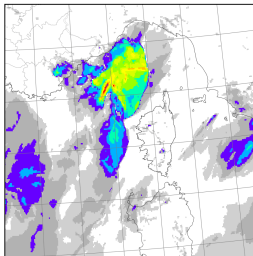
**4** Severe squall lines reach Corsica. Maximum wind gusts predicted above 150 km/h, at coasts and even inland. Lines NE motion speed prior to landing larger than 100 km/h. Maximum reflectivity seems to precede maximum wind gusts. Large reflectivities also spread in Ligurian sea/Genoa gulf. Strong wind gusts (> 100km/h) rather extend to sea away from Sardinia except in r15/m14.

**5** In 2 to 3h, squall line crosses Corsica, sea and reaches Italy. Wind gusts above 110 km/h, locally above 140 km/h.

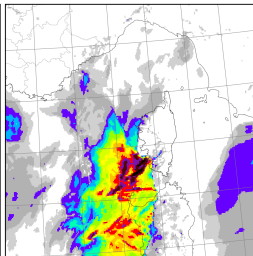


# Contraste : les seules prévisions de référence

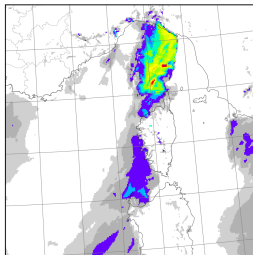
ARO base 17/08/2022 06TU val 18/08/2022 08TU (+26h)  
rafales max à 10m / max wind gusts at 10 m - km/h



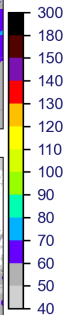
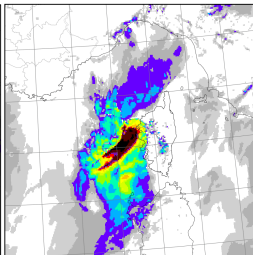
ARO base 17/08/2022 12TU val 18/08/2022 07TU (+19h)  
rafales max à 10m / max wind gusts at 10 m - km/h



ARO base 17/08/2022 18TU val 18/08/2022 07TU (+13h)  
rafales max à 10m / max wind gusts at 10 m - km/h

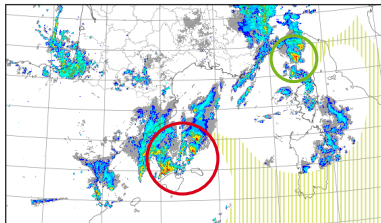


ARO base 18/08/2022 00TU val 18/08/2022 08TU (+8h)  
rafales max à 10m / max wind gusts at 10 m - km/h

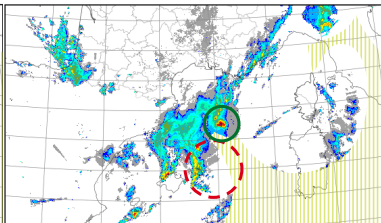


# Observations : le scénario de l'atmosphère

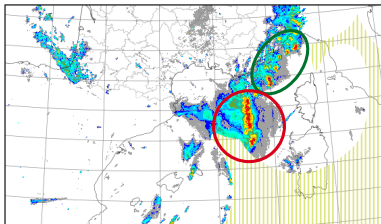
Opera composite réflectivité / reflectivity - equiv mm/h 18/08/2022 00TU



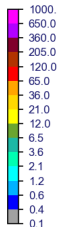
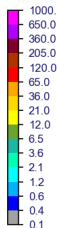
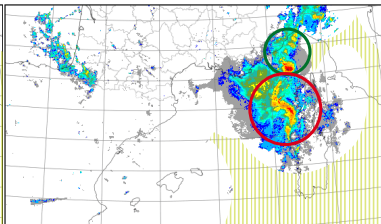
Opera composite réflectivité / reflectivity - equiv mm/h 18/08/2022 02TU



Opera composite réflectivité / reflectivity - equiv mm/h 18/08/2022 04TU



Opera composite réflectivité / reflectivity - equiv mm/h 18/08/2022 06TU



*mosaïque des radars européens tracée avec l'aide de M. Martet (CNRM, DSI)*



# En guise de conclusion

## *apports de la prévision d'ensemble utilisée pour ses trajectoires :*

- ▶ la possibilité d'un cas intense **apparaît plus tôt** ;
- ▶ les différents scénarios possibles **sont persistants** ;
- ▶ leur analyse permet de *situer dans l'espace et le temps* des **points de rendez-vous, de décision** ;
- ▶ **il en résulte un potentiel de gains très significatifs d'anticipation des alertes.**

## *aspects d'une possible mise en œuvre :*

- ▶ *choix des cartes de synthèses* ;
- ▶ *la question de passer à côté d'un élément pertinent de l'ensemble* ;
- ▶ *conditions techniques et pratiques* :
  - ▶ les éléments de l'ensemble sondent le quasi-même espace de variables ;
  - ▶ un volet *évaluation des trajectoires* s'ajoute ;
  - ▶ toutes les sorties de tous les éléments doivent être disponibles, en même temps ;
  - ▶ *le temps d'expertise doit être revu à la hausse*. 3 directions possibles pour cela ;

mais surtout :

- ▶ *une telle évolution méthodologique ne peut aboutir qu'en associant étroitement les utilisateurs (prévisionnistes) à sa conception.*

