



**HAL**  
open science

## L'imprévisible Nadine ou comment l'arrivée d'un ouragan en Méditerranée n'a tenu qu'à un fil

Florian Pantillon, Jean-Pierre Chaboureau, Évelyne Richard

### ► To cite this version:

Florian Pantillon, Jean-Pierre Chaboureau, Évelyne Richard. L'imprévisible Nadine ou comment l'arrivée d'un ouragan en Méditerranée n'a tenu qu'à un fil. *La Météorologie*, 2016, 95, pp.25-29. 10.4267/2042/61614 . hal-04255584

**HAL Id: hal-04255584**

**<https://hal.science/hal-04255584>**

Submitted on 24 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

# L'imprévisible *Nadine* ou comment l'arrivée d'un ouragan en Méditerranée n'a tenu qu'à un fil

Florian Pantillon\*, Jean-Pierre Chaboureau, Évelyne Richard

Laboratoire d'aérodynamique, Université de Toulouse / CNRS, Toulouse

\*Affiliation actuelle : Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Allemagne

florian.pantillon@kit.edu

**Note** : cet article est une version longue d'une actualité de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS : [www.insu.cnrs.fr/node/5397](http://www.insu.cnrs.fr/node/5397)

## Résumé

Les ouragans d'Atlantique Nord quittent parfois les tropiques pour les latitudes tempérées tout en conservant leur potentiel destructeur. Ce fut le cas de l'ouragan *Nadine* qui s'est approché des côtes européennes en automne 2012. Les prévisions de la trajectoire de *Nadine* furent alors incertaines, certains modèles de prévision numérique indiquant même son arrivée sur l'Europe. L'incertitude des prévisions est expliquée par l'interaction très sensible entre *Nadine* et une dépression d'altitude isolée. Une légère différence dans leur position relative entraîne la convergence ou la divergence de leur trajectoire. Une prévision d'ensemble permet de bien appréhender l'incertitude d'une telle situation.

## Abstract

***Nadine* the unforeseen or how a hurricane almost made it to the Mediterranean**

North Atlantic hurricanes sometimes leave the Tropics to enter the mid latitudes, while remaining destructive. It was the case of Hurricane *Nadine*, which approached European coasts in the autumn of 2012. The track of *Nadine* was uncertain in numerical prediction models, with some of them predicting a landfall over Europe. The forecast uncertainty is explained by the very sensitive interaction between *Nadine* and an upper-level cut-off low. A slight difference in their relative position leads to the convergence or divergence of their tracks. An ensemble forecast allows to deal with the uncertainty of such a situation.

On distingue traditionnellement les cyclones tropicaux des cyclones des latitudes tempérées. Les premiers se forment à la fin de l'été sur l'océan chaud dont ils tirent leur énergie et dans une atmosphère à faible contraste de température. Ils sont caractérisés par une structure orageuse symétrique avec des vents violents et des précipitations intenses, concentrés autour d'un œil exempt de nuages d'orage (Roux et Viltard, 1997). Les seconds se forment principalement en hiver dans une atmosphère à fort contraste de température dont ils tirent leur énergie. Ils présentent une structure asymétrique marquée par des fronts chaud et froid qui produisent l'essentiel des précipitations et des vents.

Pendant la saison d'automne, la moitié des ouragans<sup>1</sup> d'Atlantique Nord quittent les tropiques où ils se sont formés pour se diriger vers les latitudes tempérées. Ils se métamorphosent alors sous l'influence de leur nouvel environnement, au cours d'un processus appelé transition extratropicale<sup>2</sup>. Après

s'être affaiblis dans un premier temps, certains d'entre eux se ré-intensifient en tant que cyclones des latitudes tempérées, comme l'a fait le tristement célèbre ouragan *Sandy* en automne 2012 (Hirsch, 2013). Les vents violents de *Sandy* ont créé une onde de marée (ou montée des eaux) qui a inondé la ville de New York, alors que son air humide tropical associé à un front extratropical a conduit à des pluies et localement des chutes de neige record.

S'ils atterrissent plus souvent sur la côte est des États-Unis et du Canada, les ouragans qui quittent les tropiques atteignent parfois l'Europe. En automne 1995, l'ouragan *Vince* a même touché la péninsule ibérique en conservant sa structure de cyclone tropical. En général, les ouragans connaissent une transition extratropicale bien avant d'atteindre l'Europe, mais peuvent demeurer destructeurs. Ce fut par exemple le cas de l'ouragan *Gonzalo*, dont les vents forts ont provoqué des dégâts en Europe centrale en automne 2014.

## Le parcours exceptionnel de *Nadine*

L'ouragan *Nadine*, en automne 2012, a été un cyclone tropical au parcours exceptionnel (Hirsch, 2013). *Nadine*

1. Les cyclones tropicaux sont appelés ouragans sur l'Atlantique Nord et le Pacifique Nord-Est, typhons sur le Pacifique Nord-Ouest et simplement cyclones sur l'océan Indien et le Pacifique Sud.

2. Le processus inverse – la métamorphose d'un cyclone des latitudes tempérées en cyclone tropical – est également possible et est appelé transition tropicale.

s'est formée début septembre au large du Cap Vert et a perduré jusqu'à début octobre (figure 1), soit une longévité de près d'un mois, l'une des plus longues jamais enregistrées. *Nadine* a d'abord été entraînée vers l'ouest par les alizés, puis a dérivé au nord pour être reprise par les vents d'ouest. *Nadine* a ensuite exécuté plusieurs boucles en atteignant par deux fois les Açores avant de se dissiper. *Nadine* s'est en particulier approchée des côtes européennes (figure 2), est restée quasi stationnaire pendant plusieurs jours en perdant de son intensité, avant de repartir vers le large et de retrouver une nouvelle vigueur. Cette trajectoire inhabituelle a marqué les esprits pendant la campagne de mesures HyMeX en automne 2012, dédiée aux événements de précipitations intenses en Méditerranée (Ducrocq *et al.*, 2013). Un grand nombre de systèmes d'observations météorologiques au sol et aéroportés était alors déployé sur le littoral français, espagnol et italien.

En effet, à moins d'une semaine d'échéance, des prévisions numériques de plusieurs centres opérationnels montraient une trajectoire de *Nadine* vers l'Europe, et même son entrée en Méditerranée, accompagnée d'une ré-intensification rapide. Si ce scénario catastrophe ne s'est heureusement pas produit, l'éventualité d'une arrivée de *Nadine* n'en a pas moins été un problème pour la planification de la campagne de mesures. Outre la trajectoire de *Nadine*, les conditions synoptiques en Méditerranée ont également souffert d'une grande incertitude dans les modèles de prévision numérique.

Dans une telle situation incertaine, une prévision d'ensemble probabiliste est mieux adaptée qu'une unique prévision déterministe (voir encadré). Les membres de la prévision d'ensemble du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) ont montré une forte dispersion de l'altitude géopotentielle à 500 hPa sur l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée à l'approche de *Nadine* autour du 20 septembre (figure 3). Ce champ est couramment utilisé pour décrire les conditions synoptiques, comme par exemple sur la figure 2. Une forte dispersion dans sa prévision indique alors une forte incertitude dans l'évolution du temps à l'échelle synoptique. L'incertitude ainsi mesurée était de loin la plus importante de toute la campagne HyMeX.

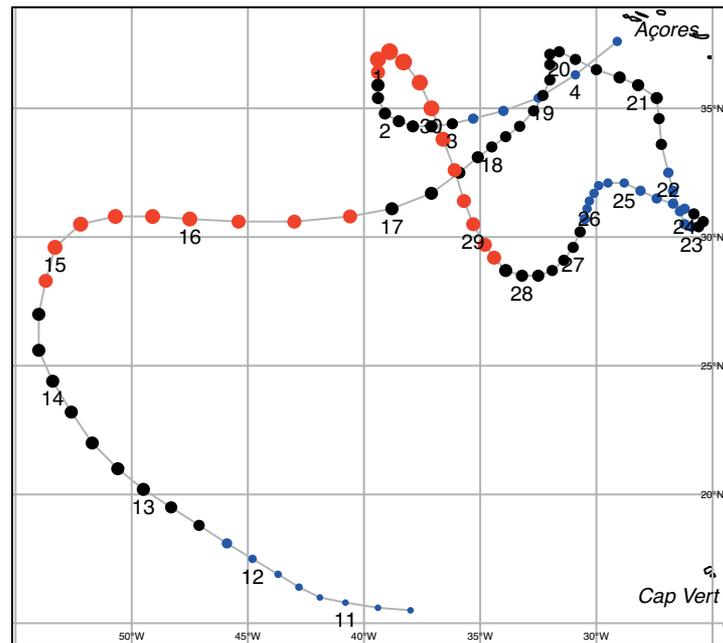


Figure 1. Trajectoire de *Nadine* d'après le best track du National Hurricane Center. La position est marquée par un point toutes les 6 h et datée chaque jour à 0 h UTC. L'intensité des vents est indiquée par la taille et la couleur des points avec, en noir, les vents de force tempête et, en rouge, les vents de force ouragan.

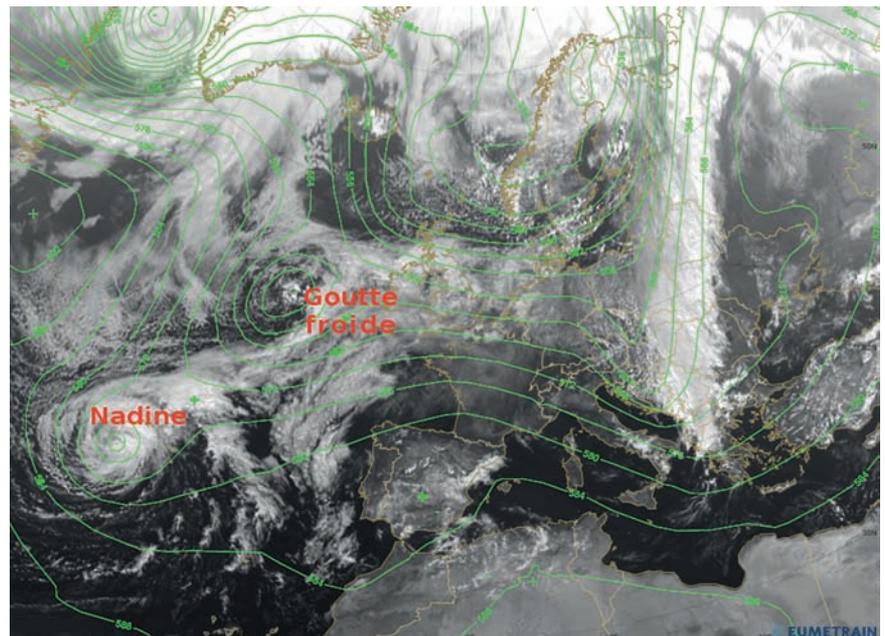


Figure 2. *Nadine* à l'approche des côtes européennes : observation *Meteosat* en canal visible et altitude géopotentielle à 500 hPa dans l'analyse CEPMMT (isolignes vertes, en dam) le 20 septembre 2012 à 12 h UTC. © Eumetsat, 2016.

## Interaction binaire avec une goutte froide

Les ouragans en transition extratropicale sont généralement associés à une faible prévisibilité en raison de leur structure hybride qui échappe aux descriptions traditionnelles comme aux modèles opérationnels. Leur trajectoire peut être très variable entre des prévisions réalisées à partir de différentes dates ou avec différents

modèles. Ce fut le cas de *Sandy*, dont l'arrivée sur New York avait été prévue plus d'une semaine à l'avance par le modèle du CEPMMT, mais seulement quelques jours à l'avance par les modèles américains. Comme souvent lors de transitions extratropicales, la perte de prévisibilité est survenue pendant l'interaction de *Sandy* avec un talweg d'altitude. Elle a affecté non seulement la trajectoire de l'ouragan, mais aussi la circulation atmosphérique des latitudes tempérées.

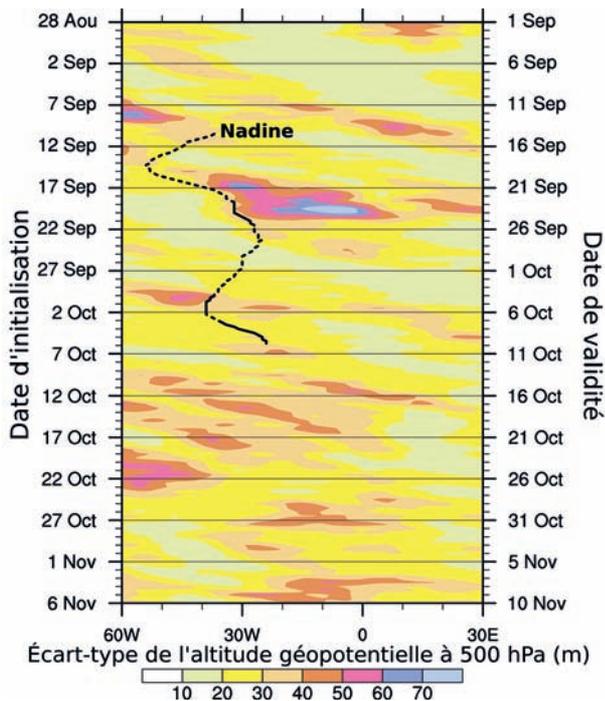


Figure 3. Incertitude des prévisions pendant la campagne HyMeX : diagramme de Hovmöller (longitude-temps) de l'écart type de l'altitude géopotentielle à 500 hPa dans la prévision d'ensemble CEPMMT à 96 h d'échéance, moyenné entre 35° N et 55° N (surfaces colorées, en m) et trajectoire de *Nadine* (courbe noire, pointillée au sud de 35° N). Adapté de Pantillon *et al.*, (2016).

*Nadine*, puis bifurque vers l'est et les côtes européennes (courbes rouges). Dans le scénario d'interaction forte au contraire (groupe 2), *Nadine* et la goutte froide se rapprochent davantage et commencent à tourner l'une autour de l'autre (courbes bleues et rouges). Leur rotation mutuelle se termine soit par leur fusion au-dessus de l'Atlantique (courbes en trait plein), soit par leur séparation et la migration de *Nadine* vers les côtes européennes (courbes en pointillé). Leur évolution couplée – approche, rotation mutuelle puis fusion ou séparation – présente les caractéristiques d'une interaction binaire, ou effet Fujiwhara (Fujiwhara, 1921), classiquement observée entre deux cyclones tropicaux se trouvant simultanément sur le même bassin océanique.

Ces caractéristiques se retrouvent dans le cas de *Nadine*, avec une faible prévisibilité à la fois de sa trajectoire et des conditions synoptiques en aval. Cependant, *Nadine* présente la particularité d'avoir interagi non pas avec un talweg d'altitude de grande taille, mais avec une dépression d'altitude isolée, ou goutte froide, de taille comparable. Cette interaction a été cruciale pour l'évolution à la fois de *Nadine* et de la goutte froide. Pour la mettre en évidence, les 50 membres de la prévision d'ensemble du CEPMMT ont été classés en deux groupes, ou clusters,

selon une méthode mathématique dite de « classification hiérarchique ascendante » (Pantillon *et al.*, 2016). Les deux groupes révèlent deux scénarios à peu près équiprobables au sein de la prévision d'ensemble et caractérisés par une interaction soit forte, soit faible, entre *Nadine* et la goutte froide (figure 4).

Dans le scénario d'interaction faible (groupe 1), *Nadine* se dirige d'abord vers le sud, puis repart vers l'ouest et le plein océan (courbes bleues). Pendant ce temps-là, la goutte froide commence par se rapprocher de

C'est le scénario d'interaction faible qui s'est effectivement réalisé, comme le montrent les trajectoires de *Nadine* et de la goutte froide dans l'analyse du CEPMMT (courbes noires). *Nadine* n'a donc pas directement produit d'événement météorologique extrême en Europe, contrairement à ce que certains membres de la prévision d'ensemble prévoyaient. Cependant, la présence de la goutte froide sur l'Europe de l'Ouest a induit un flux de sud à l'origine d'un épisode de précipitations intenses sur les Cévennes, ou événement cévenol, caractéristique de la saison d'automne et observé en détail pendant la campagne d'observations HyMeX. La forte incertitude a ainsi affecté la préparation de la campagne d'observation de cet épisode. La goutte

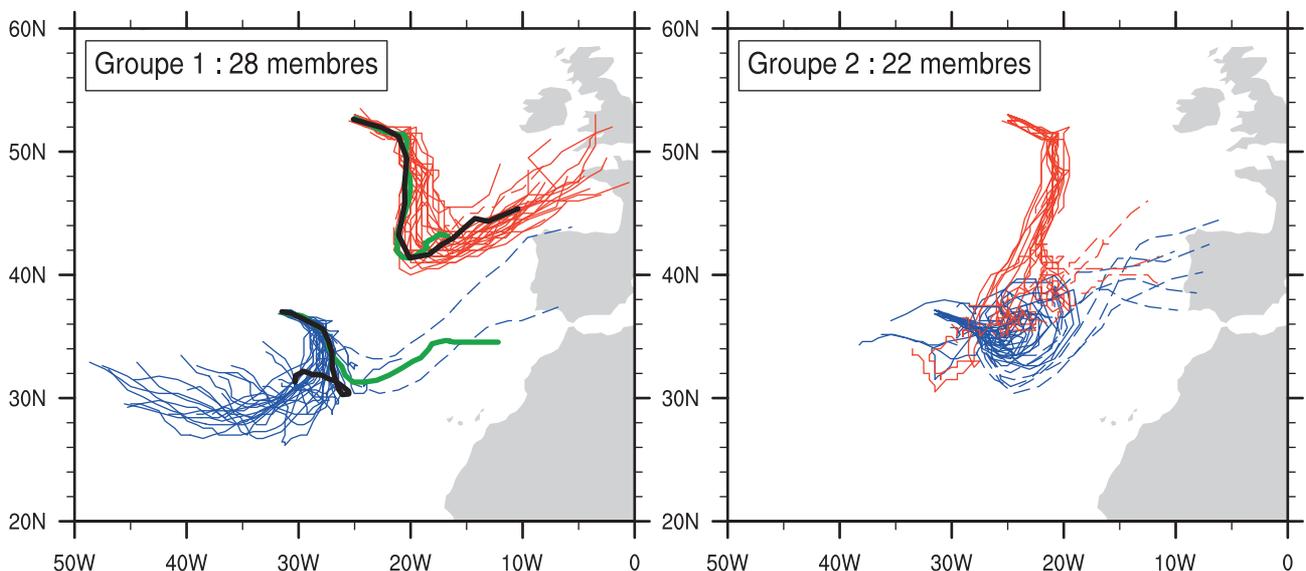


Figure 4. Interaction entre *Nadine* et la goutte froide : trajectoires de *Nadine* (courbes bleues) et de la goutte froide (courbes rouges) du 20 au 25 septembre 2012 dans la prévision d'ensemble du CEPMMT initialisée le 20 septembre, répartie entre deux groupes. Les trajectoires de l'analyse (courbes noires) et de la prévision déterministe (courbes vertes) du CEPMMT sont aussi montrées sur le diagramme de gauche. Adapté de Pantillon *et al.*, (2016).

## Chaos et prévision d'ensemble

Alors qu'il résolvait de manière numérique un système d'équations simples censé représenter une situation météorologique, Edward Norton Lorenz a constaté qu'une petite différence dans les conditions initiales pouvait entraîner une solution radicalement différente. Ce phénomène est maintenant connu sous le nom de théorie du chaos ou effet papillon (Lorenz, 1996). Pour en tenir compte en météorologie, où le phénomène est particulièrement important (Royer et Nicolis, 1994), certaines prévisions numériques sont volontairement calculées avec de petites erreurs initiales. L'évolution d'un ensemble de telles prévisions – une prévision d'ensemble – indique alors si la situation est prévisible ou au contraire incertaine, selon si l'évolution des membres individuels converge ou diverge. De plus, un ensemble de prévisions a de plus grandes chances d'anticiper un événement météorologique extrême qu'une prévision unique (Palmer *et al.*, 2002).

Au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET), une prévision d'ensemble est calculée de manière opérationnelle en complément à une prévision déterministe unique calculée à plus haute résolution. La prévision d'ensemble comprend 50 prévisions individuelles perturbées, ainsi qu'une prévision de contrôle non perturbée. Des perturbations initiales ciblées dans les zones les plus sensibles représentent l'incertitude à l'état de l'atmosphère, alors que des perturbations aléatoires de certains paramètres physiques représentent l'incertitude aux équations du modèle. En automne 2012, la prévision d'ensemble du CEPMET était calculée avec un maillage horizontal d'environ 32 km, soit deux fois plus lâche que celui de la prévision déterministe à haute résolution en raison de contraintes de temps de calcul. Le maillage horizontal est resté identique jusqu'au printemps 2016, lorsqu'il a été doublé à la fois dans la prévision d'ensemble et dans la prévision déterministe, permettant ainsi une résolution horizontale encore jamais atteinte.

froide a finalement induit une dépression de surface à l'origine de fortes précipitations et d'inondations en Grande-Bretagne.

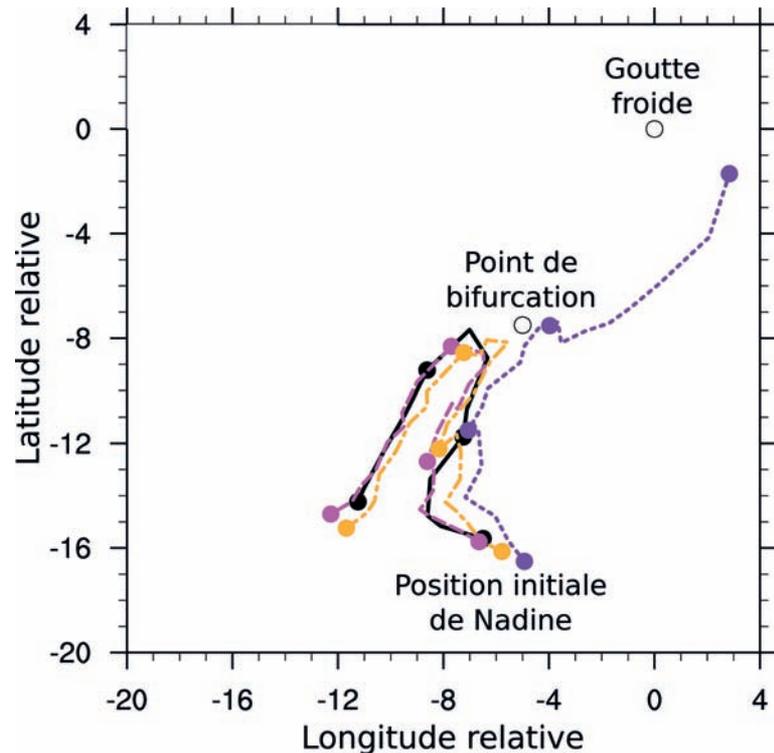


Figure 5. Point de bifurcation : trajectoire de *Nadine* relative à la goutte froide du 20 au 23 septembre 2012, données par les simulations Méso-NH (courbes colorées) à partir de trois positions initiales et l'analyse CEPMMT (courbe noire). Les cercles pleins marquent la position relative de *Nadine* chaque jour à 0 h UTC et les cercles vides la position du point de bifurcation et de la goutte froide. Adapté de Pantillon *et al.*, (2016).

Curieusement, la prévision déterministe a montré un scénario intermédiaire entre l'interaction faible et l'interaction forte, avec les trajectoires de *Nadine* et de la goutte froide dirigées toutes les deux vers l'Europe (courbes vertes). Ce scénario intermédiaire n'a été suivi que par deux des membres de la prévision d'ensemble, suggérant à juste titre que la prévision déterministe était improbable.

## Existence d'un point de bifurcation

Si la prévision d'ensemble montre clairement l'existence de deux scénarios d'interaction binaire entre *Nadine* et la goutte froide, elle ne permet pas d'expliquer pourquoi un membre particulier suit l'un ou l'autre des scénarios. Des simulations numériques ont été réalisées avec le modèle de recherche communautaire français Méso-NH afin de contrôler un facteur particulier et d'en mesurer l'influence sur l'interaction binaire. La position initiale de *Nadine* a ainsi été déplacée artificiellement par rapport à sa position réelle, ce qui influence sa trajectoire relativement à la goutte froide (figure 5).

Pour un déplacement initial de 100 km vers l'est (courbe orange), *Nadine* s'éloigne de la goutte froide après une première approche de 48 heures, comme dans l'évolution sans déplacement initial (courbe magenta) et dans l'évolution observée (courbe noire). Par contre, pour un déplacement initial de 200 km vers l'est (courbe violette), l'évolution diverge après 48 heures et *Nadine* continue à s'approcher de la goutte froide. Ce contraste montre l'existence d'un point de bifurcation dans la trajectoire de *Nadine* relativement à la goutte froide : si *Nadine* passe légèrement à l'ouest de ce point de bifurcation, elle s'éloignera de la goutte froide ; si par contre elle passe légèrement à l'est, elle s'en approchera toujours plus.

L'existence d'un tel point de bifurcation explique la séparation entre les deux scénarios dans la prévision d'ensemble. La divergence entre deux trajectoires proches explique de plus la forte incertitude dans la prévision, à la fois de la trajectoire de *Nadine* et des conditions synoptiques en aval. Cette situation est typique d'un système chaotique (voir encadré). Si une légère différence dans les conditions initiales

peut mener à une divergence de l'évolution, alors la situation est imprévisible et une prévision déterministe perd son sens.

## Perspectives pour la prévision opérationnelle

L'arrivée en Méditerranée de l'ouragan *Nadine* décrite par des prévisions numériques de plusieurs centres opérationnels ne s'est pas produite et semble ainsi relever de la science-fiction. Pourtant, 8 des 50 membres de la prévision d'ensemble opérationnelle du

CEPMMT prédisaient l'arrivée de *Nadine* sur les côtes européennes, suggérant la possibilité d'un tel scénario. La prévision d'ensemble a ainsi plusieurs rôles. D'abord, elle donne une estimation de la fiabilité de la prévision déterministe – faible dans le cas de *Nadine* – mais délivre aussi plusieurs scénarios alternatifs et leur attribue une probabilité. Elle permet finalement de mieux comprendre l'origine de l'incertitude et donc de mieux appréhender une situation peu prévisible.

Au-delà du cadre opérationnel, et avec l'aide de simulations numériques supplémentaires, la prévision d'ensemble peut mettre en lumière un processus météorologique particulier, ici

l'interaction binaire entre un ouragan et une goutte froide. Le cycle de vie atypique de l'ouragan *Nadine* à travers l'Atlantique Nord, avec sa longévité exceptionnelle et ses vagues-hésitations au large des côtes européennes, en font un cas unique dans les annales. L'histoire montre cependant qu'un ouragan peut atteindre l'Europe, exceptionnellement en conservant sa structure tropicale comme l'ouragan *Vince* en automne 1995 ou, plus fréquemment, après transition extratropicale, mais tout en demeurant destructeur, comme par exemple l'ouragan *Gonzalo* en automne 2014. De nouveaux cas d'interaction binaire sont donc envisageables et l'étude du cas exceptionnel de *Nadine* permettra de mieux les comprendre.

## Bibliographie

- Ducrocq V. *et al.*, 2013. HyMeX, les campagnes de mesures : focus sur les événements extrêmes en Méditerranée. *La Météorologie*, 80, 37-47.
- Fujiwhara S., 1921. The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 47, 287-293.
- Hirsch N., 2013. Atlantique nord 2012 : une saison active, pour la troisième année consecutive. *La Météorologie*, 82, 74-77.
- Lorenz E.N., 1996. Prévisibilité : un battement d'ailes de papillon au Brésil déclenche-t-il une tornade au Texas ? *La Météorologie*, 15, 19-21.
- Palmer T.N., Barkmeijer J., Buizza R., Klinker E., Richardson D., 2002. L'avenir de la prévision d'ensemble. *La Météorologie*, 36, 22-30.
- Pantillon F., Chaboureau J.-P., Richard E., 2016. Vortex-vortex interaction between Hurricane Nadine (2012) and an Atlantic cutoff dropping the predictability over the Mediterranean. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 142, 419-432., doi:10.1002/qj.2635.
- Roux F., Viltard N., 1997. Les cyclones tropicaux. *La Météorologie*, 18, 9-33.
- Royer J.-F., Nicolis C., 1994. Chaos et météorologie. *La Météorologie*, 5, 38-53.
-