

L'ensemencement des nuages : progrès et limites

Professeure émérite à l'Université Clermont-Auvergne à Clermont-Ferrand, Andrea Flossmann est associée au laboratoire de météorologie physique, une unité de recherche mixte (URM¹), avec le CNRS². Elle est aussi, parmi ses autres charges, coprésidente d'une équipe d'experts internationaux qui travaille sur la modification du temps.

1 Modification de la météo et formation de nuages

1.1. Pourquoi modifier le temps ?

Dans ce chapitre, on va regarder l'eau dans l'atmosphère, pas seulement sous forme de nuages, mais aussi en présence des produits chimiques ajoutés qui peuvent les modifier. La première question à se poser est : pourquoi veut-on modifier les nuages ?

D'un point de vue général, on peut dire que vouloir modifier le temps est bien dans nos gènes, que l'on pense aux danses de la pluie ou aux dieux comme Zeus inventés pour tenter de faire venir une meilleure météo ! On dira que l'on a bien évolué depuis, mais le besoin est tout de même toujours là : disposons-nous de sources d'eau fiables ? Pouvons-nous satisfaire les demandes sociétales associées ?

Il existe un groupement d'experts de l'Organisation mondiale de la météorologie³ qui se propose de répondre à ces

1. Structure regroupant chercheurs d'universités et organismes publics (comme le CNRS) pour collaborer sur des projets scientifiques spécifiques.

2. Centre national de la recherche scientifique, principal organisme public français de recherche fondamentale.

3. Institution des Nations unies coordonnant l'étude mondiale des phénomènes météorologiques et climatiques.

questions. Mais que font-ils ? On a beaucoup parlé du changement climatique, et le nombre de pays qui ont prévu d'avoir recours à des techniques de modification du temps, ou qui le font déjà, a beaucoup augmenté ces derniers temps. Malheureusement, il y a aussi des organismes qui essaient d'en tirer avantage. Ce groupement d'experts, qui existe depuis 50 ans, est là pour prodiguer des conseils sur demande et orienter les actions.

Mais, revenons-y : pourquoi faudrait-il modifier le temps en modifiant les précipitations ? Cela peut concerner la pluie mais aussi la neige ; et on peut vouloir augmenter ou bien réduire, voire empêcher les précipitations. Cela est pratiqué d'une manière récurrente par des pays comme la Russie ou la Chine qui le font pour leurs parades, qui ne se font pas sous la pluie, ou pour les

JO de Beijing⁴ ou encore en France quand on cherche à prévenir la grêle. Cela étant, il y a aussi d'autres applications, telle la dissipation des brouillards.

1.2. Processus de formation des nuages

Il s'agit de modifier les processus dans les nuages. Pour saisir les défis techniques, partons du *background*⁵ et regardons ce qui se passe en temps normal. Comment les nuages se forment-ils ?

Il faut de la vapeur d'eau, de l'humidité qui vient du sol, de l'évaporation à la surface des océans, mais aussi des continents. L'humidité s'élève, elle monte, l'air se refroidit et la vapeur d'eau se condense (*Figure 1*).

Cette condensation qui forme des gouttelettes, ou vient faire grossir celles qui existent, ne peut pas se faire dans le vide. Elle a besoin de supports matériels. On peut comparer le phénomène à la rosée qui se forme au sol où c'est le gazon qui joue ce rôle. Dans l'atmosphère, ce sont les particules d'aérosol⁶ qui sont présentes pour permettre une condensation, qui doit être en quantité suffisante. Une sous-population de ces particules d'aérosol peut servir de noyau

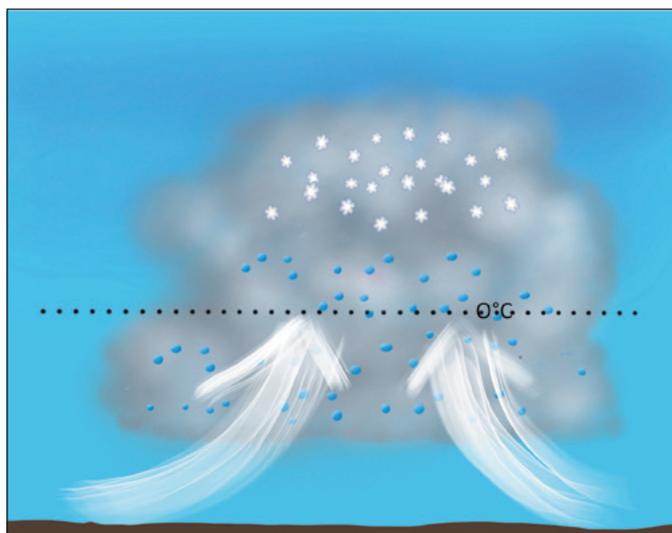


Figure 1

Processus de formation des nuages.

4. Jeux olympiques organisés à Pékin (Beijing) en 2008, où l'ensemencement de nuages a été utilisé pour éviter la pluie.

5. « Bagage scientifique ».

6. Minuscules particules solides ou liquides en suspension dans l'air, influençant la formation des nuages.

de condensation⁷ et former des gouttelettes. Des particules solubles, des sels, par exemple, jouent ce rôle encore plus efficacement.

Dans les nuages, à côté des gouttes liquides, on a une phase solide : la phase des cristaux. Ceux-ci s'étendent parfois très haut, verticalement. Des cristaux peuvent se former sur d'autres populations de particules d'aérosol, des particules insolubles ou même biogéniques⁸, qu'on appelle des « noyaux glaçogènes⁹ ». Un autre concept qu'il faut avoir en tête, c'est que dans les nuages, la phase liquide ne s'arrête pas à 0 °C du fait du phénomène de surfusion qui explique que les gouttes restent liquides, même à des températures très inférieures à 0 °C.

7. Particules autour desquelles la vapeur d'eau se condense pour former des gouttelettes de nuage.
8. Particules d'origine biologique, comme le pollen ou les spores, jouant un rôle dans la formation des nuages.

9. Particules favorisant la formation de cristaux de glace dans les nuages surfondus.

Les trois pictogrammes ci-dessous (Figure 2) résument ce que représente un nuage. Quand on les regarde dehors, les nuages ressemblent à du coton, à de la barbe à papa. Est-ce qu'on peut sauter dedans? Peut-être pas. Pour visualiser, considérons un nuage cubique de 1 km³, 1 km sur chaque côté. C'est, certes, un tout petit nuage, avec un contenu en eau liquide de 1 g par mètre cube. Il n'est pas énorme, mais si on l'intègre, cela nous donne une masse totale d'eau condensée de 1000 tonnes¹⁰ l'équivalent du poids de trois Boeing 747¹¹. Cette fois, c'est un poids énorme qui ne nous tombe pas sur la tête parce qu'il est réparti dans des microgouttelettes qui sont suspendues par le mouvement vertical ascendant.

Le processus de condensation¹² libère une chaleur

10. Un cumulonimbus pèse entre 50 000 et 300 000 tonnes.

11. Avion de ligne quadrimoteur connu pour son double-pont à l'avant, pesant environ 300 tonnes.

12. Il s'agit en réalité d'une liquéfaction (passage de l'état gazeux à l'état liquide).

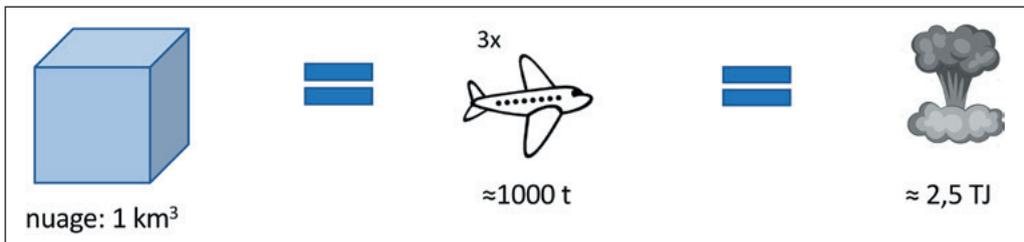


Figure 2

Poids et énergie d'un nuage de volume un kilomètre cube.

Flossmann, Andrea I., M. J. Manton, A. Abshaev, R. Bruintjes, M. Murakami, Th. Prabhakaran, Z. Yao, 2019: Review of Advances in Precipitation Enhancement Research; Bull. Atm. Met. Soc., 1465-1480, DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

latente¹³. Dans notre petit nuage témoin, cela correspond à une énergie de 2,5 téra-joules¹⁴. Cette quantité reste faible si on la compare, par exemple, avec les bombes de type Hiroshima qui ont une énergie de 55 térajoules. Mais notre nuage est quand même tout petit. Ces chiffres permettent de donner un ordre de grandeur.

13. Énergie nécessaire pour transformer de l'eau à l'état gazeux en liquide.

14. Unité d'énergie valant 10^{12} joules (1 000 000 000 000), utilisée pour quantifier de grandes quantités d'énergie.

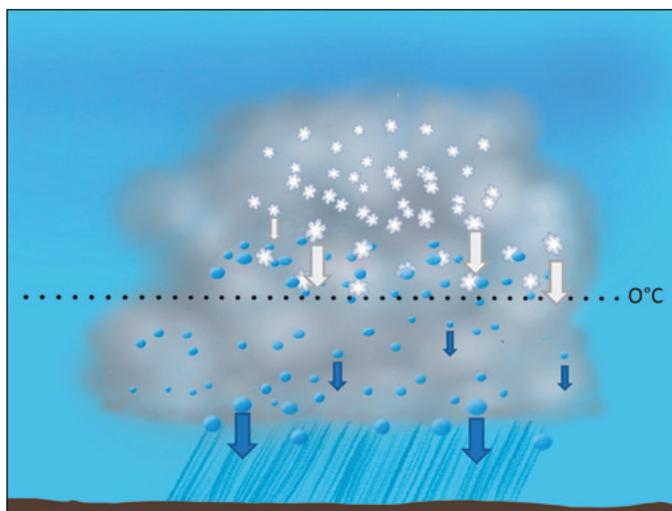


Figure 3

Processus de formation des précipitations.

Flossmann, Andrea I., M. J. Manton, A. Abshaev, R. Bruintjes, M. Murakami, Th. Prabhakaran, Z. Yao, 2019: Review of Advances in Precipitation Enhancement Research; Bull. Atm. Met. Soc., 1465-1480, DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

2 Formation des précipitations et modifications par l'ensemencement

2.1. Processus de formation des précipitations

Après la formation des nuages intervient la précipitation des microgouttelettes. Il faut les transférer ou les transformer en gouttes ou en cristaux de taille millimétrique. Le seul processus de condensation prendrait un temps considérable. En pratique, il est court-circuité par un ou des processus de collision.

Goutte-goutte, ça fait pluie. Cristal-cristal, ça fait des flocons de neige. Et goutte-cristal, ça fait un «graupelet¹⁵», couramment appelé «grêlon», «grêle» ou «particules de grêle». Qu'est-ce qui déclenche ce processus de précipitation ?

En fait, il faut des hydrométéores¹⁶ qui chutent plus vite que les autres et, sur leur chemin de la chute, collectent les autres et deviennent de plus en plus grands. Pour donner un ordre de grandeur, il faut un million de petites gouttelettes pour former une goutte de pluie. Il faut donc beaucoup de collisions. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'avoir des hydrométéores de différentes tailles, des gros et des petits, pour qu'ils puissent s'attraper les uns les autres. C'est le mécanisme de base avec lequel il faut travailler (Figure 3).

15. Grésil.

16. Grosses gouttes d'eau suffisamment lourdes pour vaincre la gravité et tomber dans le nuage.

2.2.Principe de l'ensemencement des nuages : deux méthodes

À partir de ce mécanisme, on cherche à définir un ou plusieurs moyens d'accélérer ce processus, puisque notre but est d'accroître les précipitations. La méthode consiste à élargir le spectre des tailles des hydrométéores pour qu'on en ait un nombre suffisant capable de provoquer des collisions lors de leur chute. L'idée adoptée est de rajouter (ensemencement) des particules d'aérosols dans les nuages pour remplir ce rôle.

On distingue deux types d'ensemencements : l'un est dit « de type froid », et agit sur les cristaux ; l'autre est dit « de type chaud », et agit sur les gouttes.

Sur la **figure 4**, on voit une petite image datant de 1946 de Langmuir¹⁷, Vonnegut¹⁸ et Schaefer¹⁹, les trois scientifiques qui viennent de découvrir que l'iodure d'argent²⁰ en particules est très efficace pour faire congeler le liquide

surfondu²¹. C'est l'une des particules très utilisées pour l'ensemencement froid. Une alternative consiste à utiliser de la neige carbonique²² ou du CO₂ liquide²³ qui refroidissent l'air soudainement et cassent la surfusion ; d'autres solutions sont aussi à l'étude.

Pour l'ensemencement chaud, on complète les particules d'aérosol naturel²⁴, représentées par la courbe en bleu (**Figure 5**). On ajoute de gros cristaux de sel qui vont former des gouttes qui seront plus grandes, et le processus de collision est déclenché.



Figure 4

Photo de Langmuir, Vonnegut et Schaefer prise en 1946.

21. Liquide restant à l'état liquide bien qu'il soit refroidi en dessous de son point de congélation.

22. Dioxyde de carbone solide (CO₂ à -78,5 °C), utilisé pour refroidir ou modifier les nuages.

23. Dioxyde de carbone sous forme liquide à haute pression, utilisé pour certaines expériences atmosphériques.

24. Particules naturelles comme le sel marin ou les cendres volcaniques jouant un rôle dans la formation des nuages.

17. Irving Langmuir, physicien ayant étudié l'ensemencement des nuages et le comportement des particules dans l'atmosphère.

18. Bernard Vonnegut, chimiste ayant découvert l'effet glaçogène de l'iodure d'argent sur les nuages.

19. Vincent Schaefer, pionnier des techniques d'ensemencement, notamment avec l'utilisation de neige carbonique.

20. Composé chimique, solide ionique composé d'iode et d'argent utilisé pour stimuler la formation de cristaux de glace dans les nuages.

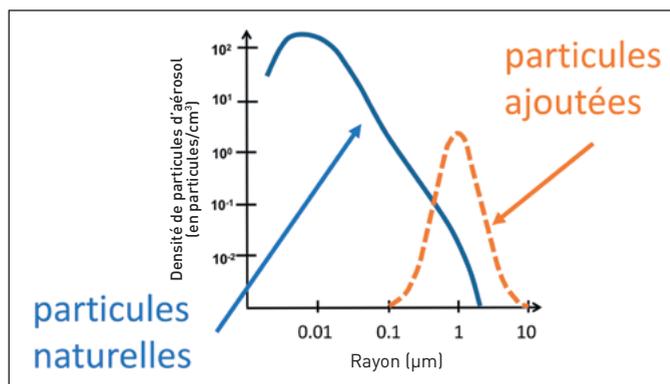


Figure 5

Graphique représentant le nombre de particules ajoutées de chaque type en fonction de leur rayon.

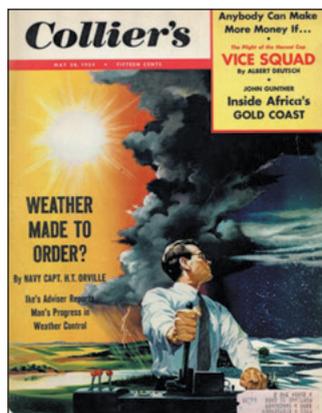


Figure 6

Couverture du magazine Collier's de mai 1954.

3 Efficacité de l'ensemencement

3.1. Approche expérimentale

Une augmentation des pluies par cette méthode avait été observée dans les panaches des moulins à papier²⁵ en Afrique du Sud. Quand on a découvert la possibilité d'influencer la formation de la pluie, dans les années 1940 et au début des années 1950, cela a suscité un grand engouement. On pensait pouvoir faire pleuvoir quand on le voulait, comme le titre sur la couverture de ce magazine de 1954, «Weather Made to Order?»²⁶, le fait miroiter (Figure 6). Malheureusement, ça n'a pas tenu ses promesses du fait du grand problème que constitue la grande variabilité des nuages naturels : parmi deux nuages qui coexistent dans le même ciel la même journée, l'un va pleuvoir naturellement, et l'autre non.

Autre situation fréquente : le signal créé par l'ensemencement est trop faible par rapport aux bruits naturels existants. Pour le moment, on a du mal à démontrer statistiquement que ce petit signal d'ensemencement existe. Ces difficultés ont diminué la mise en œuvre des techniques d'ensemencement, et ce n'est que récemment que la recherche a repris. Elles ont mis l'accent sur deux approches qui permettent finalement de définir les bonnes conditions pour que les

techniques d'ensemencement fonctionnent.

Pour la première approche, il faut réaliser beaucoup d'essais, à l'instar de ce que l'on fait en expérimentation médicale. On fait des doubles blancs²⁷, des blancs aveugles²⁸ et des doubles blancs aveugles. Il faut un grand nombre d'échantillons pour obtenir des informations statistiquement significatives, cela veut dire qu'il faut des milliers d'expériences. Pour le moment, cette approche n'est pas mûre ; on n'a pas encore à disposition des milliers d'expériences, en particulier en raison de leur coût.

Dans l'autre approche envisagée, et là, on a finalement des preuves que ça peut marcher, on se focalise sur les nuages qui ont une variabilité naturelle réduite, à l'exemple des nuages qui se forment sur un relief. Dans ce cas, quand l'air arrive, il est forcé de monter et de se refroidir : un nuage se forme.

3.2. Succès de l'ensemencement à l'iodure d'argent

Les premières preuves expérimentales du succès de ces processus viennent de deux études : d'abord, l'expérience qui a été faite dans les montagnes Rocheuses aux États-Unis ; ensuite, celle qui a été conduite en Australie, l'air

27. Étude comparative composée de deux séries d'expériences identiques ou analogues.

28. Étude où les participants ne savent pas s'ils reçoivent le traitement ou un placebo.

25. L'industrie papetière d'Afrique du Sud est très productrice d'aérosols, notamment de sulfates.

26. «Contrôler le temps?»

arrive du Pacifique et monte sur le relief.

Dans ces deux études, on observe d'abord la formation de gouttes puis, plus haut, de quelques cristaux, mais il y a une grosse zone d'eau surfondue qui demeure et les nuages ne précipitent pas. On rajoute alors des produits chimiques, de l'iodure d'argent dans ce cas-là. Pour réussir cette opération, qu'on appelle l'ensemencement, on a le choix entre plusieurs techniques.

Sur le schéma ci-dessus (Figure 7) est représenté l'idéal : on utilise des torches sous les ailes d'avion pour cibler la zone d'eau surfondue. On peut aussi éjecter des torches en altitude. Une technique un peu meilleur marché utilise des fusils qui sont lancés au niveau de la base du nuage (en rose sur l'image de gauche). Cette technique est plutôt utilisée par les militaires en Russie et en Chine. En France, dans la plus grande partie des opérations, on utilise des brûleurs :

un mélange d'acétone²⁹ et d'iodure d'argent est brûlé et, avec les courants ascendants, arrive dans cette région critique (même région en rose), transforme les gouttes en cristaux de glace qui entrent ensuite en collision avec les autres cristaux et produisent de la neige.

La technique des brûleurs a été mise en œuvre par les scientifiques en partenariat avec les agences de l'eau dans l'Idaho et le Wyoming³⁰ pour augmenter la couverture neigeuse dans les bassins versants qui alimentent l'eau potable. Cela a vraiment constitué la première preuve publiée, documentée, de l'efficacité de l'ensemencement.

29. Solvant organique inflammable utilisé dans diverses expériences chimiques et techniques industrielles.

30. États du nord-ouest des États-Unis connus pour leurs expériences sur l'ensemencement des nuages pour accroître les précipitations.

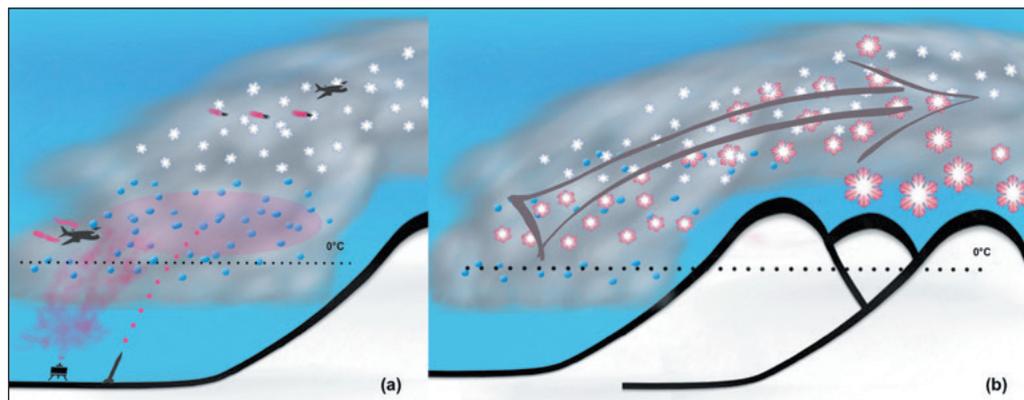


Figure 7

Ensemencement de nuages froids par utilisation d'iodure d'argent près de reliefs.

3.3. Ensemencement de nuages convectifs aux sels

L'autre approche évoquée consistait à ensemercer avec des sels qui créent de grosses gouttes dans la phase liquide ; celles-ci vont former des agrégats qui vont déclencher la précipitation du nuage (*Figure 8*). Une grosse campagne est en cours en Inde : l'expérience Caipex³¹, qui en est aujourd'hui à 300 ensemcements. Il manque donc encore un peu de travail pour arriver à un ensemble de cas statistiquement significatifs.

4 Développements futurs

4.1. Recommandations méthodologiques

Quelles consignes donner aux opérateurs en tant que groupement de conseil ?

31. Projet d'étude visant à améliorer les précipitations dans les régions arides en Inde.

Premièrement, il faut une phase d'études climatiques pour connaître le type de nuages que l'on va traiter et les particules qui sont normalement là en arrière-plan. Est-ce que ce sont des particules que l'on va traiter ou remplacer ? Il faut aussi un programme soigné de simulations numériques.

Deuxièmement, on devra travailler sur deux domaines (*Figure 9*) pour pointer les différences dues au traitement. Ces deux domaines devront être choisis côte à côte pour qu'ils soient autant que possible dans le même écoulement.

Un choix qui est souvent fait, mais qui est à éviter absolument, est de modifier les options de démarrage et les protocoles de campagne et de changer les indicateurs de contrôle. La cohérence entre les conditions appliquées aux deux sites à comparer est une condition essentielle.

Les meilleurs résultats qu'on a eus étaient dans les nuages

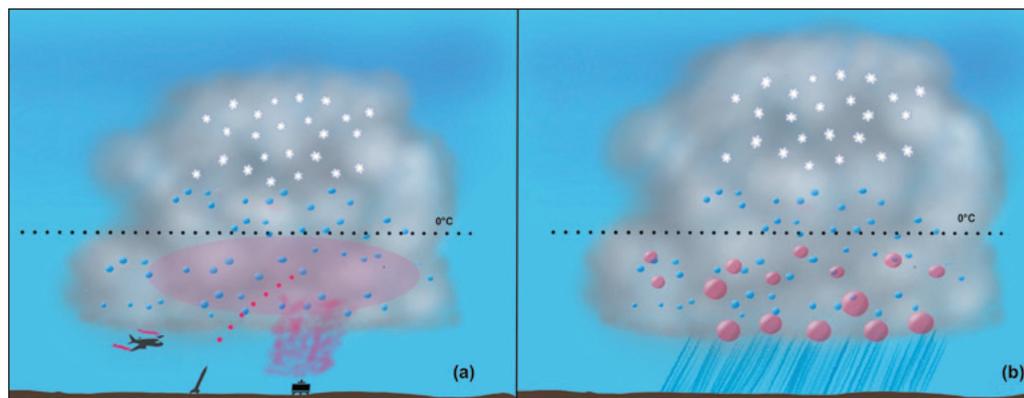


Figure 8

Ensemencement de nuages chauds par utilisation de cristaux de sel.



Figure 9

Détermination de zones d'ensemencement (en marron) et de zones témoin (en blanc) pour la réalisation d'essais.

orographiques hivernaux³² avec un ensemencement avec l'iodure d'argent par avion, en torche, parce que, là, on peut vraiment cibler la zone, et mieux encore si le nuage est proche d'une précipitation naturelle. Dans ces conditions, on a vraiment des résultats encourageants.

Dans tous les cas, il faut réaliser qu'il n'est pas utile de faire ce travail sur un seul nuage ou couple de nuages. Il faut le faire à plus grande échelle pour donner une viabilité convaincante sur un bassin versant, même si cette stratégie, bien sûr, réclame beaucoup d'ensemencements.

4.2. Ensemencement, géopolitique et environnement

Chaque fois qu'un État annonce qu'il fait de l'ensemencement, le voisin crie : « On nous vole de l'eau. » C'est potentiellement une source de conflit. Il y a une

32. Nuages formés par le soulèvement de l'air sur des montagnes, souvent ciblés pour l'ensemencement.

dizaine d'années, l'Iran avait accusé Israël de lui voler de l'eau³³; mais l'inverse a aussi eu lieu.

Récemment, on a signalé l'intervention de complottistes autour des inondations en Espagne³⁴. Une théorie circulait selon laquelle les ensemencements au Maroc avaient créé les inondations en Espagne. En fait, s'il est vrai que le Maroc fait des expériences de modification des précipitations, celles-ci n'ont rien à voir avec ce qui s'est passé en Espagne. Mais le potentiel de conflit est tout de même là.

Par ailleurs, il reste indispensable de veiller à l'impact écologique de ces expériences parce que l'iodure d'argent est un produit potentiellement toxique en grande quantité pour les écosystèmes aquatiques.

33. L'Iran a accusé Israël en 2018 de provoquer une sécheresse en « volant » les nuages grâce à l'ensemencement.

34. Inondations des 29-30 octobre 2024 dans la province de Valence ayant causé 240 morts.

Conclusion

On peut considérer qu'aujourd'hui, après des décennies d'essais infructueux et d'observations décevantes, les techniques d'ensemencement de l'atmosphère pour déclencher des précipitations sont réellement disponibles.

Mais leur complexité apparaît aussi. La nature ne se laisse pas dominer si facilement. Son fonctionnement est en effet marqué par une grande diversité et variabilité de situations. Cette complexité se traduit, bien sûr, par le coût des expériences préparatoires dont on a cité l'importance.

Cela laisse une grande inconnue à ce programme qui n'est autre que la prévision du coût des opérations. Apparemment, il n'existe pas encore de visibilité conclusive sur la question. Là aussi doit régner une grande diversité de situations. Que sera l'extension à grande échelle de l'ensemencement? Encore un peu de patience pour avoir la réponse.