

Du ciel peint ici par Van Gogh peuvent naître des stratus, un des types de nuages que l'ASNR modélise pour étudier leurs interactions avec les aérosols.

Prévoir la contamination radioactive de l'environnement

Modéliser le dépôt de rejets radioactifs pose deux défis majeurs. L'un concerne l'étendue des échelles à considérer : du micromètre, pour simuler la multitude de mécanismes en jeu liés aux aérosols, à la taille des continents qu'ils peuvent traverser. L'autre défi porte sur les expérimentations à concevoir pour observer les interactions entre aérosols et gouttelettes. Relever ces défis a conduit à découvrir des phénomènes inattendus.

[CONTEXTE]

En cas d'accident nucléaire conduisant à des rejets radioactifs dans l'atmosphère, une part importante de la radioactivité est émise sous forme d'aérosols. Ces particules en suspension dans l'air se dispersent au gré des vents formant des nuages si l'humidité le permet et retombant lors des précipitations. Elles contaminent alors les sols, exposant les populations et les écosystèmes à la radioactivité. Comment évaluer ces retombées pour proposer des actions de protection des populations ?

Quel est le point commun entre le Covid-19 et l'accident nucléaire de Fukushima ? Les aérosols ! Dans le cas de la pandémie, ils ont été les principaux vecteurs de la transmission du virus. Concernant l'accident à Fukushima en 2011, c'est une source majeure de dispersion de la radioactivité dans l'environnement, notamment de césium et d'iode. De manière générale, les aérosols contribuent à la qualité de l'air, à la formation des nuages, au cycle de l'eau sur Terre, au changement climatique ou encore à la fertilisation des sols. « Cela fait une quinzaine d'années que nous étudions les multiples interactions entre les aérosols, les nuages et la pluie », raconte Pascal Lemaître, physicien à l'ASNR. Rappelons qu'un nuage est un ensemble de gouttelettes et cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Et ce sont les aérosols qui servent de support à leur formation. Cela se produit selon un mécanisme baptisé « activation », très sensible à leur nature chimique et à leur taille. Ainsi, les gros aérosols solubles sont de meilleurs noyaux de condensation que les aérosols fins et insolubles. Quant aux aérosols fins, ils sont déviés à chaque impact avec des molécules d'air jusqu'à entrer en collision avec les gouttelettes du nuage, qui les collectent alors. Que sait-on des aérosols radioactifs ? Ils peuvent mesurer entre un nanomètre (nm) et quelques

micromètres (µm). Ceux dont le diamètre est entre 200 nm et 2 µm se déposent très lentement sur les sols et peuvent s'accumuler dans l'atmosphère et traverser continents et océans parfois pendant six mois. Dès l'accident de Tchernobyl, en 1986, l'IRSN a mené des recherches pour modéliser le plus précisément possible les retombées d'aérosols liées aux rejets radioactifs.

Le but ? Mieux comprendre les phénomènes qui déterminent la contamination des sols afin d'éclairer les autorités sur les conséquences et les actions de protection des populations à mettre en œuvre. Car, si au moment des rejets, les conséquences pour la population sont la plupart du temps essentiellement dues à l'exposition au panache radioactif et à l'inhalation, après l'accident, ce sont les quantités de produits radioactifs déposées au sol qui permettent de définir, par exemple, des restrictions de consommation et de commercialisation des denrées alimentaires. « C'est dans ce contexte que se situent nos travaux », ajoute Arnaud Quérel, chercheur à l'ASNR. Ils apporteront une meilleure précision que les modèles de dispersion atmosphérique de la radioactivité. »

Les premiers modèles de dépôt, développés après Tchernobyl puis Fukushima, étaient empiriques. Ils ont servi à reconstruire le plus finement possible les contaminations des sols constatées à la suite de ces accidents. Ils sont très performants pour calculer

des retombées dans des conditions météorologiques similaires, mais n'offrent pas la capacité de prévoir les retombées radioactives par exemple en cas d'orages, de grêle, de neige, de bruines ou avec des types de nuages très différents, comme des cumulonimbus ou des stratus.

Une question de taille

Seules des descriptions physiques peuvent fournir un cadre suffisamment général. Cela suppose de modéliser les mécanismes en jeu tels que la conversion des aérosols en nuage ou leur collecte par les gouttes de pluie. « Nous développons de tels modèles théoriques pour chacun des mécanismes que nous avons identifiés. Puis nous confrontons nos simulations à l'expérimentation », résume Pascal Lemaître.

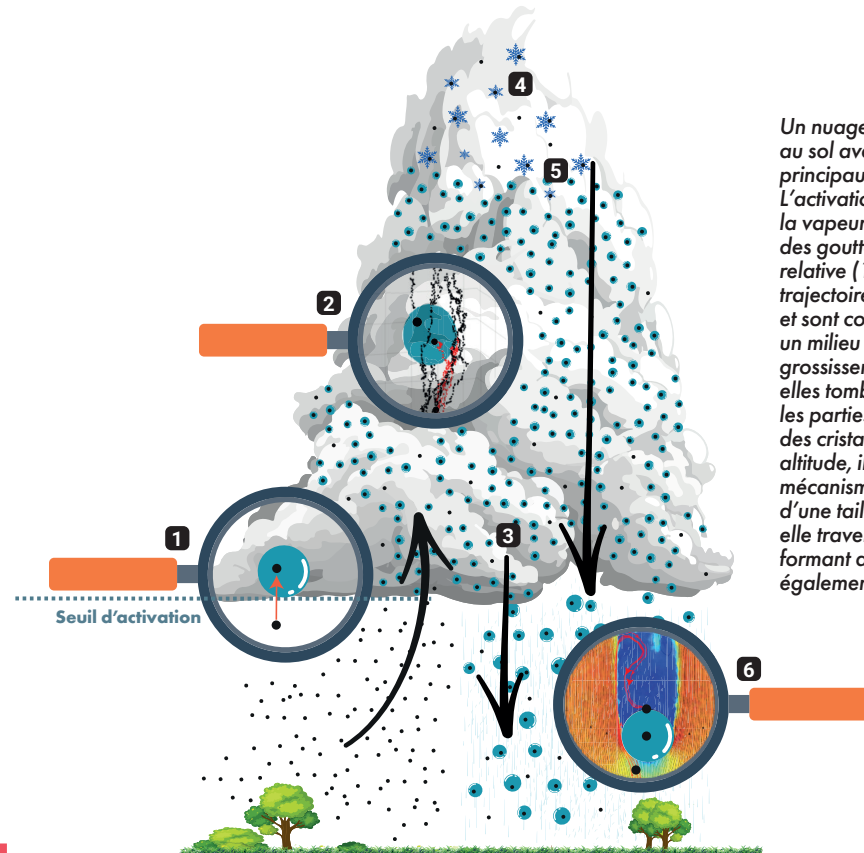
Mais comment mesurer ces phénomènes expérimentalement ? Ce problème s'est posé dès les années 1970, quand des pluies acides ont dévasté des forêts en raison de particules soufrées. Or mesurer le dépôt des aérosols au cours des précipitations dans la nature représente un véritable défi. Cela requiert des conditions météorologiques rares : de la pluie sans vent. Les premières mesures ont été effectuées dans les années 1990, sur des aérosols naturels. Parallèlement, Pascal Lemaître et Arnaud Quérel ont conçu un dispositif unique qui permet de reproduire des gouttes de pluie en laboratoire : « Elles mesurent plusieurs millimètres de diamètre

et chutent à des vitesses pouvant atteindre 7 mètres par seconde, précise Pascal Lemaître. Sous l'effet des forces aérodynamiques, elles oscillent à grande fréquence (environ 100 Hertz), sans compter qu'elles sont chargées électriquement avec jusqu'à 30 millions de charges élémentaires par goutte en cas d'orage. »

Les chercheurs ont ainsi mesuré la fraction de particules collectée par une goutte de pluie lors de sa chute selon leur taille, dans une gamme de diamètre de 200 nm à 2 µm. Surprise ! Il s'avère que la collecte est extrêmement sensible à la taille de l'aérosol : une variation de 100 nm induit une différence d'efficacité de capture de 1 000. De surcroît, celle-ci n'est pas linéaire : les aérosols les plus fins (moins de 300 nm) comme les plus gros (plus de 2 µm) sont presque tous collectés lors du passage d'une goutte de pluie, alors qu'un seul aérosol sur 10 000 est collecté lorsque son diamètre est d'environ 1 micron. Les chercheurs ont également étudié l'influence de nombreux autres paramètres, comme la charge électrique des gouttes et des aérosols – les aérosols radioactifs étant chargés –, l'influence des variations de température et d'humidité dans le voisinage de la goutte, etc.

Ce n'est pas tout. « Grâce à ces expérimentations, nous avons identifié un mécanisme majeur insoupçonné, ajoutent les chercheurs : la capture arrière, où une partie des aérosols atteint la face arrière de la goutte et finit par y être collectée. »

DES AÉROSOLS QUI TOMBENT EN PLUIE

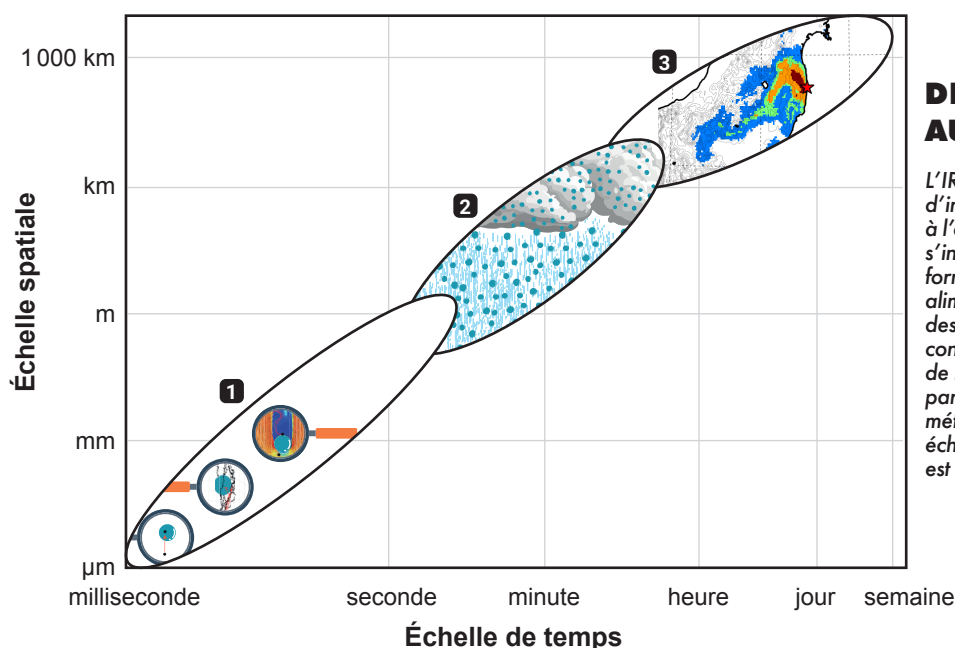


Un nuage est comme un puits d'aérosols qui retombent au sol avec la pluie. Cela se produit selon deux principaux mécanismes : l'activation et la collecte. L'activation intervient quand des aérosols captent la vapeur d'eau et la condensent autour d'eux, formant des gouttelettes au-delà d'un seuil critique d'humidité relative (1). Les aérosols fins (8 nm ici) ont une trajectoire erratique due au mouvement brownien et sont collectés par ces gouttelettes (2). Le nuage est un milieu dense. En s'entrechoquant, les gouttelettes grossissent. Au-delà d'environ 0,2 mm, trop lourdes, elles tombent sous forme de pluie (3). Par ailleurs, dans les parties du nuage où les températures sont négatives, des cristaux de glace se forment (4). À une certaine altitude, ils coexistent avec des gouttelettes (5). Certains mécanismes font rapidement croître la glace. Au-delà d'une taille critique, celle-ci précipite puis fond quand elle traverse les couches plus chaudes du nuage, formant des gouttes de pluie. Des aérosols peuvent également être collectés à l'arrière de ces gouttes (6).

Cahier partenaire réalisé avec



Depuis le 1^{er} janvier 2025, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) se sont réunis pour devenir l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).



DE LA GOUTTELETTE AU CONTINENT

L'IRSN a développé des modèles d'interaction aérosol/gouttelettes à l'échelle microphysique (1) dont s'inspirent les modèles physiques de formation des nuages (2), qui eux-mêmes alimentent les modèles de contamination des sols par les aérosols à l'échelle continentale (ici du Japon dans la région de Fukushima), également développés par l'IRSN, à partir des prévisions météorologiques (3). L'étendue des échelles spatiotemporelles à balayer est considérable.

Comme si, lors d'un trajet en voiture, des mouches se retrouvaient collés à la lunette arrière. Ce mécanisme s'est révélé très important pour les aérosols submicroniques.

Qu'en est-il des mécanismes à l'échelle des nuages ? Les mesures y sont encore plus délicates. Il faudrait de coûteuses expérimentations par avion, sinon reproduire des nuages en laboratoire. « *Nous abordons donc cela par le calcul*, précise Pascal Lemaître. *Nous travaillons avec les spécialistes mondiaux des modèles physiques de formation des nuages, Andrea Flossmann et Marie Monier, du Laboratoire de météorologie physique de Clermont-Ferrand.* »

En s'appuyant sur la théorie et les descriptions microphysiques, les chercheurs prédisent la formation des différents types de nuages à l'échelle de la dizaine de kilomètres et, autant que possible, les précipitations qui en découlent lorsque ceux-ci sont matures, ramenant au sol les aérosols préalablement assimilés par les gouttes.

Des modèles de plus en plus réalistes

Enfin, simuler la contamination du sol à plusieurs milliers de kilomètres du lieu d'émission des rejets radioactifs nécessite encore d'autres modèles, météorologiques cette fois, avec des mailles de l'ordre du kilomètre. Leur évolution a été colossale ces dernières années. Les modèles de Météo-France notamment permettent désormais de prévoir de façon fiable la taille et l'altitude des nuages, la pluie, la grêle ou la neige. Ils fournissent un flux continu de millions de données quotidiennes sur la vitesse et la direction des vents, la température de l'atmosphère ou la nature des précipitations.

« *En couplant ces données météo avec des modèles de dispersion, puis nos modèles de dépôt à l'échelle des nuages et de la pluie, nous pouvons désormais*

mieux simuler la contamination des sols en polluants radioactifs en cas de précipitations, confirment les chercheurs. *Notre modélisation des dépôts est de plus en plus réaliste. Et elle est applicable à tout type de situation météorologique.* »

Il reste néanmoins un problème ! Des écarts d'un facteur 10 à 100 fois sont constatés entre les mesures effectuées dans la nature et les modélisations pour les aérosols autour du micromètre. « *Nous pensons avoir compris pourquoi !* avance Pascal Lemaître. *Cela serait dû à un biais dans la stratégie expérimentale, un biais lié au fait que l'on compare ici deux données de nature différente.* » De fait, on ne mesure pas des dépôts au sol, mais on les déduit de la diminution de la concentration en aérosols de l'air quand il pleut. Or une partie de cette diminution est due à un tout autre mécanisme que la collecte par la pluie : une partie des aérosols est entraînée par les vents qui accompagnent souvent la pluie. Ils restent ensuite dans l'atmosphère. « *L'impact de ce mécanisme serait prépondérant pour les aérosols pour lesquels la collecte est très peu efficace, précisément ceux dont la taille avoisine le micron* », ajoute le physicien. Des expériences sont planifiées cette année pour confirmer cette hypothèse.

Cela permettra de valider le modèle physique et à terme de développer un outil opérationnel pour conseiller les autorités de façon encore plus réaliste. La modélisation fine de la physique des aérosols dans les nuages et les précipitations n'intéresse pas que la sûreté nucléaire, elle est également essentielle pour les prédictions climatiques, car ces particules interviennent dans le bilan d'énergie solaire. « *Nos modèles ont déjà été intégrés à ceux du Met Office, le service national britannique de météorologie*, explique Pascal Lemaître. *Ils ont apporté une nette amélioration à leur modélisation climatique. Ce qui valide par ailleurs notre approche.* » ■

RÉFÉRENCES

- P. Lemaître et al., Microphysical modelling of aerosol scavenging by different types of clouds: description and validation of the approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024.
- P. Lemaître et al., Experimental evidence of the rear capture of aerosol particles by raindrops. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017.
- A. Quétel et al., The importance of new collection efficiency values including the effect of rear capture for the below-cloud scavenging of aerosol particles. *Atmospheric research*, 2014.
- A. C. Jones et al., Below-cloud scavenging of aerosol by rain: a review of numerical modelling approaches and sensitivity simulations with mineral dust in the Met Office's Unified Model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022.