

La pluie artificielle*

Artificial rain

PAR J. ROUILLEAU

Les conditions qui semblent nécessaires au déclenchement de la pluie naturelle. — Principes des procédés visant à déclencher artificiellement la pluie : faire apparaître des cristaux de glace dans un nuage surfondu où il n'en existe pas; insémination d'un sel hygroscopique (ClNa) dans un nuage de température supérieure à 0° C. — Les procédés pratiques d'insémination. — Les difficultés d'observation des résultats obtenus. — Les enseignements de l'expérience; les possibilités de la pluie artificielle.

The conditions which appear necessary to release natural rain. Principles of processes intended to release rain artificially: make ice crystals appear in a surfused cloud where they do not exist; insemination of a hygroscopic salt (ClNa) in a cloud having a temperature above 0° C. Practical methods of insemination. Difficulties of observing the results obtained. The teachings of experience; possibilities of artificial rain.

Il y a environ sept ans que l'on est parvenu à réaliser les premières précipitations provoquées et, depuis, l'expression « pluie artificielle » a fait fortune pour désigner celles-ci. Ce n'est pas une dénomination très heureuse, car la confusion de l'averse que l'on peut parfois déclencher à volonté avec la formation artificielle d'une pluie quelconque a jeté quelque trouble dans bien des esprits, et particulièrement dans ceux qui se plaisent aux anticipations. On a vu là le

moyen de fertiliser les déserts, ou au contraire d'assécher des pays entiers, en privant prématurément d'eau les nuages qui y auraient normalement précipité. La réalité est loin d'être aussi extraordinaire. Ce sont les possibilités réelles que nous nous proposons d'examiner aujourd'hui, et pour le faire plus commodément, nous rappellerons d'abord rapidement le mécanisme de la pluie naturelle, que celui de la pluie provoquée suit fidèlement.

I. — MÉCANISME DE LA PLUIE CONTINUE ET DE L'AVERSE

Un nuage donnant une pluie continue, appartenant à la partie centrale d'un système nuageux, précipite à la cadence moyenne de 1 à 2 mm par heure, pendant 50, 70 heures ou davantage. Or, il ne contient à chaque instant qu'une quantité d'eau condensée correspondant à quelque 5 mm de hauteur de pluie; il est donc capable de précipiter une quantité d'eau dix ou vingt fois su-

périeure à celle qu'il contient. On est donc obligé d'admettre qu'un tel nuage est continuellement reformé à mesure qu'il abandonne son eau condensée. Cet apport constant ne peut évidemment provenir que de la vapeur d'eau atmosphérique. Encore faut-il remarquer que la vapeur d'eau contenue dans le nuage ne peut pas intervenir, car il est indispensable que l'atmosphère qui environne les gouttelettes d'eau condensée se maintienne à la saturation.

La vapeur d'eau nécessaire à l'alimentation du

(*) Communication à la Société Hydrotechnique de France (18 mars 1953).

nuage ne peut donc provenir que de l'extérieur de celui-ci. Comme on constate que tous les nuages donnant des précipitations continues sont le siège d'une ascendance générale de l'air qu'ils surmontent, on est tout naturellement conduit à penser que c'est la vapeur d'eau présente en dessous du nuage, et entraînée verticalement vers le haut, qui fournit en définitive l'eau de la pluie. Ce point de vue est solidement appuyé par les faits, et le calcul de la vitesse verticale nécessaire pour entretenir une cadence de précipitation conforme à celle qu'on observe conduit à des valeurs qui sont en bon accord avec la vitesse verticale déterminée par d'autres méthodes, c'est-à-dire de l'ordre de 10 cm/s.

Un nuage d'averse ne donne au contraire jamais de précipitation continue, mais une précipitation qui, en général plus intense qu'une pluie, est toujours brève, avec une durée de l'ordre de l'heure. De tels nuages, *cumulus congestus* ou *cumulonimbus*, sont le résultat d'ascendances très violentes, comprises entre 1 et 10 ou 15 m/s. Mais ces ascendances, lorsqu'elles proviennent de l'échauffement du sol, ne sont pas continues et semblent constituées par une succession de bulles d'air chaud.

Les averses, comme les pluies continues, ne peuvent donc se produire que si les nuages qui leur donnent naissance sont le siège de mouvements ascendants.

Mais on sait d'autre part que ces mouvements ascendants n'entraînent pas obligatoirement la formation de la pluie : les cumulus très développés qu'on observe fréquemment en été sont certainement formés par l'ascendance des courants d'air humide, et cependant il est fréquent qu'ils ne donnent aucune précipitation.

Nous sommes ainsi conduits à penser qu'un nuage est un système stable par lui-même, et que les gouttelettes d'eau qui le constituent ne peuvent pas spontanément grossir assez pour que leur vitesse de chute devienne supérieure à la vitesse du courant vertical qui les entraîne vers le haut.

On sait qu'un nuage est constitué de gouttelettes d'eau, dont le diamètre moyen est compris entre 1 et 3 centièmes de mm, dont la vitesse de chute est de l'ordre du centimètre/seconde, et qui sont espacées les unes des autres par une distance de l'ordre du millimètre. Naturellement, il ne s'agit là que d'ordres de grandeurs qui peuvent varier beaucoup d'un nuage à l'autre. Les gouttes de pluie sont considérablement plus grosses que les gouttelettes d'eau des nuages : leur diamètre moyen est compris entre 0,5 et 2 mm, leur volume est donc 100.000 à 1.000.000 de fois plus grand que celui des gouttelettes des nuages. Ces chiffres montrent l'énorme différence qui sépare la condensation de la précipitation.

Aussi, que le nuage ne précipite pas de lui-

même n'a en soi rien de surprenant, car il ne suffit pas d'imaginer un faible grossissement des particules du nuage pour expliquer la formation de pluie. Bien plus que la stabilité du nuage, c'est son instabilité éventuelle, ou plutôt la cessation de l'état stable, qu'il faut interpréter.

Il est bien clair qu'on passe du stade condensation au stade précipitation par transformation de petites gouttes en grosses gouttes. On peut imaginer que les petites gouttes se réunissent entre elles pour en former de plus grosses. Mais l'expérience montre qu'une telle réunion ne se produit pas au sein d'un ensemble de gouttes de mêmes dimensions. Ce n'est que dans le cas de la traversée d'un nuage par des gouttes beaucoup plus grosses que celles qui le constituent que la coalescence joue un rôle; elle n'est donc pas capable d'expliquer la formation privilégiée de grosses gouttes à partir de petites. On ne peut donc retenir ce mécanisme simple.

On doit à Tor BERGERON d'avoir proposé en 1933 un mécanisme très différent, qui rend compte des faits et a même pu être vérifié expérimentalement. C'est la croissance de certains éléments du nuage par la condensation de vapeur d'eau.

Supposons qu'un nuage contienne à la fois des gouttelettes d'eau surfondue et des cristaux de glace. Il s'ensuit que les cristaux de glace servent de centres de condensation pour la vapeur d'eau provenant des gouttelettes surfondues : ils grossissent au détriment de ces dernières. L'auteur de cette théorie a pu calculer qu'en atmosphère calme, à -10° , toute l'eau liquide d'un nuage peut se réunir en vingt minutes sur des cristaux de glace, à condition que ceux-ci soient au nombre de un par cm^3 .

Les nuages contenant de l'eau surfondue, loin d'être exceptionnels, sont très fréquents dans l'atmosphère, sous nos latitudes tout au moins. Aussi la plupart des précipitations, dans nos régions, sont-elles dues à ce mécanisme, ainsi que STICKLEY, aux Etats-Unis, l'a montré de façon formelle : au cours de plus de 300 vols d'étude, il a pu constater que 97 % des pluies se produisaient quand la surface supérieure des nuages était glacée. Les autres cas correspondant à des nuages entièrement situés au-dessous de l'isotherme 0° , se rencontrèrent dans les régions subtropicales, où vraisemblablement de très gros noyaux de Cl Na , fortement hygroscopiques, provenant de la mer, jouent le même rôle que les cristaux de glace.

D'ailleurs, qu'il s'agisse de cristaux de glace ou de particules hygroscopiques, on peut montrer que la croissance de ceux-ci est assez limitée, et ne peut guère rendre compte que de la formation de gouttes d'une centaine de microns de diamètre.

Mais ces gouttes, dont la vitesse de chute est notable, tombent vers le sol, en captant, sur tout leur parcours, les gouttelettes du nuage, et leur diamètre s'accroît d'autant plus qu'elles restent plus longtemps au sein du nuage. On obtiendra ainsi des gouttes qui atteignent 0,5 mm après un parcours de l'ordre de 2.000 m. Si le nuage est le siège de courants ascendants violents, qui augmentent la durée de la traversée par la goutte, celle-ci pourra atteindre quelques millimètres de diamètre.

II. — LA FORMATION ARTIFICIELLE DE LA PLUIE

Il existe donc deux cas où la pluie ne se produit naturellement pas, et où cependant peu de conditions manquent pour qu'elle se produise :

- D'abord, le cas des nuages surfondus mais qui ne contiennent pas de cristaux de glace;
- Ensuite, le cas des nuages dont la température est partout *supérieure à 0°*, mais où ne se trouvent pas de gouttelettes hygroscopiques.

Dans un nuage surfondu où les cristaux de glace sont absents, il nous suffira de créer un petit nombre de ceux-ci pour que le processus de BERGERON intervienne et que la pluie prenne naissance. Plusieurs moyens sont à notre disposition pour atteindre ce but : l'un d'eux consiste à « semer » dans le nuage des particules très froides qui créeront des noyaux de cristallisation. Ces particules très froides seront le plus souvent de la carboglace, c'est-à-dire de l'anhydride carbonique solide, qui se sublime, à la pression ordinaire à -80° . C'est la substance qui a été la plus utilisée pour la formation de pluie artificielle, car elle est fabriquée industriellement et son emploi est très pratique. Mais on pourrait aussi, comme l'a montré E. BRUN, utiliser de l'air liquide plus froid encore, puisqu'il bout à -185° ou -190° C.

Un autre moyen consiste à semer dans le nuage surfondu une substance qui cristallise, à très peu près, comme l'eau. Dans ce cas, les particules de cette substance servent de noyaux de condensation solide, et la vapeur d'eau s'y condense en glace. Plusieurs corps sont susceptibles de jouer ce rôle. L'iodure d'argent est certainement l'un des plus commodes, et c'est lui que, les premiers, les Américains ont utilisé pour provoquer des précipitations.

Dans le cas des nuages dont la température est partout supérieure à 0° , il existe un moyen

En conclusion, pour qu'il pleuve, il faut deux sortes de conditions :

- *D'abord un état physique convenable du nuage, la coexistence d'eau surfondue et de glace, ou encore de gouttes salines hygroscopiques et d'eau.*
- *Et ensuite un mouvement ascendant de l'air, condition météorologique aussi essentielle que la première, pour une précipitation tant soit peu notable.*

bien simple en principe qui consiste à ajouter un sel hygroscopique. Une simple projection de Cl Na pulvérisé sur un nuage doit donc suffire à provoquer une précipitation qui n'avait aucune chance d'être spontanée.

PRATIQUE DES INSÉMINATIONS.

Cette insémination du nuage peut s'effectuer pratiquement en lâchant sur le sommet du nuage, d'un avion qui le survole, une petite bombe dont l'explosion à l'intérieur du nuage disperse quelques centaines de grammes de neige carbonique.

On a également entrepris le lancer, à partir du sol, de fusées qui, éclatant sous le nuage, dispersent de l'AgI. Les très fins cristaux d'AgI, s'ils sont emportés par les courants ascendants, pénètrent dans le nuage et, continuant à s'élever, atteignent les régions où la température est assez basse pour que leur action puisse se manifester.

RÉSULTAT DES INSÉMINATIONS.

Il est curieux de constater que les méthodes de pluie artificielle, inaugurées vers 1945 par LANGMUIR et SCHAEFFER aux U.S.A., ont rencontré dans ce pays un scepticisme poussé à l'extrême, tandis qu'en même temps se constituaient des sociétés pour l'exportation du procédé.

Des positions aussi contradictoires ne peuvent s'expliquer que par un manque d'information, que justifiait dans bien des cas un manque d'expériences précises. Le contrôle de telles expériences n'est pas très facile en effet, avec des moyens simples, car :

- a) Il est difficile de repérer la position de l'avion, donc du nuage attaqué;

b) Le « temps d'induction », qui amène un décalage de position entre le point d'attaque et le lieu de la précipitation, rend difficile la recherche de la coïncidence dans le temps de l'insémination et de ses effets;

c) La pluie artificielle n'étant possible que lorsque la pluie naturelle l'est aussi, on ne peut être absolument sûr qu'il ne s'agit pas d'une pluie naturelle, qu'en répétant les expériences assez de fois pour que la quasi-simultanéité dans le temps et dans l'espace, de l'insémination et de la précipitation, ne puisse être imputée à une coïncidence fortuite qu'avec une probabilité extrêmement petite.

La difficulté de repérage a disparu par l'emploi du radar qui permet de détecter la position et l'instant exacts de la naissance de la précipitation au sein du nuage, ce qui a pour effet de réduire considérablement le temps d'induction.

Quant à la confusion possible avec la pluie naturelle, elle est maintenant levée, car le nombre d'expériences positives de pluie artificielle dûment contrôlées qui ont été effectuées est tel (de l'ordre de plusieurs centaines) qu'une coïncidence fortuite paraît *a priori* absolument impossible.

Dans l'ensemble, les expériences s'accordent pour montrer que la pluie artificielle n'est possible qu'en attaquant des cumulus très développés verticalement. De plus, seuls les cumulus en cours de développement donnent une pluie substantielle. S'ils sont en voie d'affaiblissement, l'insémination les dissipe. Cette dissipation est de règle avec les nuages stratifiés.

Lorsque le cumulus est à son développement maximum, l'attaque provoque, en même temps que la pluie, la dissipation de la partie du nuage qui surmonte l'isotherme 0°. On constate alors que la quantité de pluie est au moins égale à la masse d'eau liquide contenue dans la partie du nuage qui s'est dissipée.

RÉSULTATS QUANTITATIFS.

Dans un certain nombre d'expériences, on a pu mesurer l'importance et l'étendue des précipitations obtenues. Pour les *cumulus congestus*

ayant de l'ordre de 3.000 m d'épaisseur, les quantités d'eau obtenues sont de l'ordre de 5 à 10 mm de hauteur.

En tenant compte de la masse du nuage susceptible de se dissiper et de se transformer en pluie, on a pu établir des abaques indiquant la hauteur de pluie d'après l'altitude de la base du nuage et celle de son sommet, ainsi que la température à l'un de ces deux niveaux. Ces abaques dus à R. EYRAUD, qui ont été établis en tenant compte de l'évaporation de la pluie sous le nuage, donnent des résultats en bon accord avec les observations pour les cumulus étalés, inférieurs à la réalité pour les cumulus en cours de développement, mais ne conviennent pas en cas de dissociation spontanée.

Ils permettent donc une première estimation : on peut ainsi juger de la rentabilité de l'opération éventuelle.

RENDEMENT UTILE DE LA PLUIE ARTIFICIELLE.

L'intérêt de la pluie artificielle dépend du but poursuivi : s'il s'agit d'un but agricole par exemple, la pluie artificielle ne présente d'intérêt qu'en période de sécheresse. Par contre, s'il s'agit d'accumuler de l'eau dans un bassin de retenue, on peut penser qu'il y a également intérêt à augmenter les précipitations à tout moment, même si les pluies naturelles ne font pas absolument défaut.

Dans certains cas, on a pu, d'après les données statistiques d'occurrence, d'épaisseur de nuages, et également de hauteur de pluie naturelle, se faire une idée de l'apport que pourrait représenter la pluie artificielle en attaquant systématiquement tous les nuages convenables. Ainsi pour la Beauce, où la hauteur annuelle de pluie naturelle est de 600 mm, on peut estimer cet apport supplémentaire à 100-150 mm, soit 25 %. Mais ces 100 ou 150 mm exigeraient une centaine de jours d'expérience répartis principalement de mars à septembre. Si l'on admet que les frais de fonctionnement de chaque expérience sont de l'ordre de 40.000 fr., et que la surface de précipitation soit à chaque fois de 100 km², le m³ d'eau reviendrait à 25 centimes.

CONCLUSIONS

La formation de pluie artificielle paraît possible lorsque les conditions météorologiques nécessaires à la pluie naturelle préexistent, même lorsque l'état physique du nuage ne permet pas

à cette pluie de se former. Il existe donc un cas où l'on pourra obtenir une précipitation artificielle abondante : c'est celui où la pluie naturelle n'a pas encore commencé, mais tomberait d'elle-

même quelque temps plus tard. Ce cas ne manque pas d'intérêt, car il permet de choisir l'emplacement et l'heure de la précipitation, et d'éviter que celle-ci n'ait lieu inutilement ailleurs ou plus tard.

Dans de nombreux cas, on peut d'ailleurs provoquer une pluie qui ne se serait pas produite d'elle-même, par suite, par exemple, de la limitation du nuage en altitude. Il n'est pas utile dans ce cas d'insister sur l'intérêt de la méthode.

Nous avons vu que, si la pluie ne se produit pas systématiquement lorsqu'on attaque un nuage, en revanche il est beaucoup plus fréquent que le nuage se dissipe complètement. Ce n'est que dans des cas très particuliers de forte instabilité qu'il est susceptible au contraire de se développer. Il paraît donc possible de faire disparaître un brouillard et de dégager une piste d'aérodrome.

Dans le même ordre d'idées, la dissociation des nuages givrants et leur résolution en pluie pourrait peut-être permettre d'améliorer notablement les conditions de vol.

Citons enfin, pour terminer, un cas particulier

où l'attaque d'un nuage peut être du plus grand intérêt, c'est le cas du *cumulo nimbus*, dont le traitement, en hâtant l'évolution du phénomène et en provoquant la précipitation avant que le régime tourbillonnaire ne devienne assez puissant, peut éviter la formation de la grêle. Il convient d'être prudent sur ce dernier point, car il est déjà arrivé, dans un pays voisin, qu'en essayant de faire de la pluie, l'expérimentateur a provoqué, sans qu'on sache très bien pourquoi, justement de la grêle.

Mais il est un point sur lequel il convient d'insister. Jusqu'à maintenant, il ne paraît pas possible de modifier, dans quelque sens que ce soit, les précipitations d'un système nuageux de grande perturbation. On ne peut songer qu'à agir sur les nuages d'averses, donc à modifier partiellement, dans les régions tempérées tout au moins, le régime pluviométrique.

Ne soyons pas cependant pessimistes. La pluie artificielle est encore très jeune et nous apprendrons sûrement à mieux la connaître, et à gagner plus facilement ses faveurs quand elle aura un peu vieilli.

