

La pluie provoquée Techniques opératoires et contrôle des résultats*

F

Louis SERRA
Conseiller scientifique
à la Direction des Etudes et Recherches
de l'Electricité de France

RÉSUMÉ

Après un rappel de ce que fut la longue histoire des tentatives humaines pour conquérir la maîtrise du temps — ou plus simplement pour essayer de « faire pleuvoir » — l'auteur s'attache tout spécialement à définir quelle est la nature de la controverse qui, à travers les succès ou les échecs enregistrés depuis quelques dizaines d'années d'« opérations à l'échelle industrielle », oppose encore partisans et détracteurs de la pluie artificielle.

Les techniques opératoires d'insémination des nuages, avec leurs possibilités et leurs limitations, sont passées en revue. Puis vient le « Contrôle des résultats » à qui il appartient, en principe, de dire si l'opération a été efficace ou non. Mais encore faut-il s'assurer — ce qui n'a pas toujours été fait — de l'efficacité des méthodes elles-mêmes de contrôle. On s'imagine trop souvent « tester l'opération » alors qu'en fait on teste aussi l'opérateur.

En rappelant, pour terminer, ce qu'en pense aujourd'hui un organisme officiel — et compétent dans ce domaine : l'Organisation Météorologique Mondiale, l'auteur conclut par l'affirmation qu'en matière de pluie provoquée, des possibilités réelles existent, mais s'il faut, pour les exploiter, savoir « opérer », il faut aussi savoir « contrôler ».

ABSTRACT

After a historical recall of the human attempts to obtain the weather mastership, or in a more simple term « to produce rain », the author describes all especially the nature of the controversy which still opposes supporters and detractors of the artificial rain, through successes or failures being occurred since about several tens years of « industrial-scale operations ».

The possibilities and limits of the technical operations of cloud seeding are reviewed in this paper and the checking of the results provides a reply whether or not the operation has been successful. This supposes a close scrutiny of the control methods.

At last, the author recalls the opinion expressed by the World Meteorological Organization, which is competent in this field and comes to the conclusion that there are significant results and possibilities in matter of artificial precipitation. However it must be kept of mind that for exploiting it, the checking is as important as the know-how.

SOMMAIRE

- I. La pluie « provoquée » à travers les âges
 - 1.1. Les origines
 - 1.2. Les premières tentatives « à caractère scientifique »
 - 1.3. Recherches et progrès récents
 - 1.4. L'ère de « la pluie provoquée à l'échelle industrielle ».

- II. Le problème de la pluie provoquée

* Cet article a fait l'objet d'une conférence de M. L. SERRA lors d'une assemblée générale de l'Association internationale des Sciences hydrologiques (Section française), le 7 décembre 1976 à Paris.

III. *Les techniques de la pluie provoquée*

- 3.1. Science pure ou science appliquée
- 3.2. Les précipitations naturelles
- 3.3. Le déclenchement artificiel des précipitations.

IV. *Le contrôle des résultats*

- 4.1. Les deux aspects du contrôle
- 4.2. Le contrôle : possibilités et limitations
- 4.3. La précision des mesures pluviométriques
- 4.4. Les différentes méthodes de contrôle.

V. *Conclusions sur la pluie provoquée*

I. LA PLUIE « PROVOQUÉE » A TRAVERS LES AGES

C'est devenu aujourd'hui une banalité de dire que la météorologie est aussi vieille que le monde, tant il est vrai que toutes les activités humaines, de la plus humble aux plus complexes, furent — et resteront d'ailleurs toujours — soumises au temps qu'il fait ou qu'il fera.

Depuis les âges les plus reculés, l'homme, du seuil de sa caverne, scrutait déjà le ciel avant de partir pour la chasse ou de lancer son frêle esquif sur l'eau. Des années, des siècles, des millénaires passèrent. A l'âge de la pierre avait succédé l'âge du bronze, puis l'âge du fer. En même temps que l'homme « s'humanisait », la civilisation prenait peu à peu son essor. Mais toujours et tout au long des siècles, toutes les formes de l'activité humaine furent dominées par le même souci : la connaissance du temps, et, tout naturellement aussi, par le même rêve : pouvoir un jour modifier à volonté ce temps que, depuis les origines du monde, on n'avait toujours fait que subir.

C'est sans souci des contingences terrestres que la nature, dans sa superbe indifférence, nous brûle ou nous inonde au gré de ses caprices. Asservir cette nature — c'est-à-dire faire à volonté la pluie et le beau temps — ou, sans aller si loin, tenter de la « régulariser » — c'est-à-dire pratiquement, faire, lorsque les précipitations naturelles sont déficientes, un peu de cette pluie que l'on appelle à tort « artificielle » — a été, et demeure, l'un des plus vieux rêves qu'ait pu faire l'humanité.

L'histoire est déjà fort longue, en effet, et très riche, de toutes les tentatives de l'homme pour conquérir la maîtrise du temps. Limitée longtemps aux seules forces spirituelles, elle a peu à peu élargi son champ d'action jusqu'aux frontières extrêmes des plus récentes découvertes scientifiques. Et sans pouvoir ici entrer dans beaucoup de détails, c'est une histoire qui, dans ses grandes lignes, mérite bien d'être rappelée.

1.1. LES ORIGINES

Les pratiques magiques ou rituelles pour obtenir de la pluie ont existé de tous temps et dans tous les pays. Il n'est pas facile, on s'en doute, de recueillir sur de telles pratiques — toutes extrêmement anciennes, et bien souvent discrètes — toute l'information que l'on aurait voulu. On sait cependant que si la plupart d'entre elles ont eu, et ont conservé, un caractère plutôt inoffensif, il en est d'autres, par contre, qui furent d'une extrême barbarie.

On rapporte par exemple, que vers le VIII^e siècle, dans l'empire des Mayas, les prêtres organisaient, en période de sécheresse, de grandes processions à l'issue desquelles d'innocentes vierges parées de bijoux, étaient, pour apaiser le courroux des dieux, précipitées dans les eaux verdâtres d'un gouffre sacré. Il est probable qu'en d'autres temps ou en d'autres lieux des coutumes aussi barbares aient pu exister. Il est probable aussi qu'elles ont aujourd'hui disparu. Mais il subsiste encore, en certaines régions du monde, des cérémonies rituelles où la demande de pluie s'accompagne du sacrifice d'un animal.

Subsistent également — et cela même dans les pays que l'on dit les plus « évolués » — ces pratiques de nature plus pacifique que sont les processions, les incantations et prières que l'on adresse à Dieu, soit directement, soit à ceux de ses Saints qui passent pour être les spécialistes de la pluie.

Il y a eu aussi, et elles subsistent encore, des pratiques rogatoires de caractère plus profane, dont l'une des plus pittoresques est, sans doute, en Afrique du Nord, la « procession de la Mère Bangou », cette Mère Bangou qui

semble avoir succédé, dans la croyance populaire, à la Cérès romaine et à la Tanit phénicienne, gardiennes des récoltes et dispensatrices de la pluie.

Il faudrait encore mentionner tous les rites magiques qui se pratiquent en tant d'autres lieux, notamment dans l'Inde et tout l'Extrême-Orient, et qui, pour la plupart, conservent tout le mystère des choses lointaines et très anciennes.

Disons seulement, pour en finir avec cette évocation trop brève des pratiques magiques ou rituelles qui furent et qui demeurent en usage, que la pluie si ardemment désirée vient parfois les couronner, remplissant d'espérance et de foi les cœurs purs qui savent se satisfaire de la puissance des forces spirituelles.

Mais l'homme, toujours insatiable, et jugeant, sans doute, que ces « interventions extérieures » d'essence divine étaient, tous comptes faits, assez peu efficaces, en vint à penser que — puisqu'on n'est jamais si bien servi que par soi-même — il serait peut-être temps qu'il « intervienne » à son tour, personnellement. Et c'est ainsi que la science fut mobilisée, dès ses premiers balbutiements, pour tenter, avec plus ou moins de bonheur, de maîtriser le temps.

1.2. LES PREMIÈRES TENTATIVES « A CARACTÈRE SCIENTIFIQUE »

Ce furent d'abord — si on peut appeler cela « de la science » — les archers qui, vers le milieu du xv^e siècle, lançaient leurs flèches vers les nuages pour essayer de crever ce que l'on pensait être des sortes d'outres remplies d'eau.

Plus tard, et toujours dans le même but, ce furent des tirs de mousqueterie, et même le canon.

Dès leurs premières tentatives à caractère scientifique pour essayer d'agir sur les éléments, les hommes semblent, en effet, avoir attribué une grande importance au bruit de la poudre noire, qu'ils devaient apparenter au bruit du tonnerre.

Un des plus célèbres marins du siècle de Louis XIV, le chef d'escadre de Forbin, raconte, par exemple — ainsi que nous l'a rapporté Henri Laurent — avoir vu l'amiral d'Estrées au cours d'une croisière aux îles d'Amérique, dissiper à coups de canon les nuages ou les trombes qui se formaient trop près de son navire.

En 1837, le savant Arago prouva dans sa *Notice sur le tonnerre* que le tir du canon devait, au contraire, augmenter les chances de précipitations et non pas, comme le pensait l'amiral d'Estrées, les diminuer. Vingt ans plus tard de Fonvielle défendit l'opinion d'Arago dans son livre *Eclairs et tonnerres*. Traduit en anglais, cet ouvrage connut un certain succès en Amérique et inspira Francis Power qui, en 1870, publia tout un volume intitulé *La pluie et la guerre*.

Ses idées furent combattues avec quelque vivacité, mais incitèrent Daniel Ruggle, un ancêtre des « faiseurs de pluie », à prendre en 1880 un brevet d'invention sur un procédé ayant pour but de tirer l'eau du ciel au moyen de ballons chargés de matières explosives. Ces ballons étaient retenus par un câble conducteur destiné à permettre la mise à feu électrique au moyen d'une étincelle fournie par une bobine d'induction.

Quelques « résultats » furent, ou semblèrent avoir été obtenus. Malgré les critiques plutôt vives des milieux scientifiques des États-Unis, l'enthousiasme populaire s'empara de l'affaire et les discussions prirent une telle ampleur que, pour vider la querelle, le Sénat, au congrès de 1891, vota un crédit de 9 000 dollars pour faire des expériences officiellement contrôlées de déclenchement artificiel des précipitations.

Ces expériences eurent lieu dans une des régions les plus arides du Texas. Si, d'après les journaux américains de l'époque, elles se révélèrent positives, le rapport officiel établi par le Service météorologique demeura beaucoup plus prudent et réservé dans ses conclusions.

A cette même époque, en 1891 pour être précis, Louis Gathmann, de Chicago, auteur d'un ouvrage intitulé *Rain produced at will* (La pluie à volonté) avait — il faut le signaler aussi — tenté de perfectionner le procédé en envoyant de la glace carbonique dans les nuages au moyen d'obus explosant à une hauteur d'environ 600 pieds.

Naturellement toutes ces recherches — et ces trouvailles — ne restèrent pas localisées sur le Nouveau Continent et elles gagnèrent l'Europe, surtout sous forme de procédés de lutte anti-grêle, où se distinguèrent l'Autriche, l'Italie et la France.

La découverte progressive des « lois de la nature », l'appui sur une recherche non plus empirique mais fondamentale, allaient dès lors ouvrir aux applications technologiques — les opérations de déclenchement artificiel des précipitations — des perspectives sans commune mesure avec celles qui avaient pu être imaginables dans la période pré-scientifique.

1.3. RECHERCHES ET PROGRÈS RÉCENTS

Dans le domaine de la physique des nuages un certain nombre de découvertes importantes s'étaient faites,

jour après jour. Il est bon de les rappeler brièvement pour montrer que « la pluie artificielle » ou « la modification du temps » reposent, quoi qu'en disent leurs détracteurs, sur des bases scientifiques solides.

C'est Wegener que l'on considère comme ayant été le premier à avoir, en 1911, suggéré que la coexistence de cristaux de glace et de gouttelettes en surfusion provoquait dans le nuage un état d'instabilité se traduisant par un grossissement rapide des particules du nuage.

Puis c'est Wigand qui, en Allemagne, et à peu près à la même époque, inaugure une série de recherches, conduites avec toute la rigueur scientifique désirable, pour trouver des procédés de modification des masses nuageuses.

De 1930 à 1932 le Hollandais Veraart avait fait quelques essais d'insémination de certains nuages au moyen de substances diverses — notamment de CO₂ comme Gathmann en 1891 — des substances lancées d'un petit avion. Mais il semble qu'il n'ait pas eu une notion bien claire du processus de développement des cristaux dû au refroidissement brutal des gouttelettes surfondues, et ses tentatives, quelque peu empiriques, restèrent sans lendemain.

Et l'on arrive à 1933. A l'assemblée générale de l'U.G.G.I., tenue à Lisbonne, le Suédois Tor Bergeron présente sa théorie devenue classique sur la formation des précipitations, où il indique très clairement le rôle primordial joué par la phase solide dans le déclenchement du processus de formation des pluies extra-tropicales — en reconnaissant d'ailleurs que cette théorie ne pouvait expliquer le mécanisme de formation des « pluies de nuages chauds ».

L'Allemand Findeisen, de son côté, avait eu à peu près les mêmes idées. Il les développe dans une série de notes de 1932 à 1941-42 en posant les bases d'une recherche systématique des noyaux de congélation. C'est lui qui, le premier, signala les possibilités pluviogènes des corps ayant la même structure cristalline que la glace.

Ces « explications » — nouvelles — sur le mécanisme de la formation des précipitations ne manquèrent pas de soulever un certain nombre de critiques ; mais ce que l'on a pris l'habitude, depuis, d'appeler « la théorie Findeisen-Bergeron » a su y résister et est aujourd'hui définitivement admise dans tous les milieux scientifiques.

Il est intéressant, à ce propos, de noter pour la petite histoire — et cela doit flatter notre amour propre national — que ces « explications », un Français, Gabriel Gilbert, en avait eu l'idée il y a maintenant plus de 70 ans, c'est-à-dire bien des années avant qu'elles n'aient été formulées par Findeisen ou Bergeron.

Dans un mémoire intitulé *Sur la formation de la pluie et sur l'origine des cirrus*, Gabriel Gilbert s'exprime très nettement sur ce point en affirmant que, mis à part les brouillards et brumes constitués uniquement de gouttelettes liquides, la « vraie pluie » est due à l'action des cirrus glacés qui agissent comme condensateurs de l'humidité atmosphérique. Leurs cristaux grossissant et s'alourdissant finissent par tomber et donnent par fusion, en traversant des couches plus chaudes de l'atmosphère, des véritables gouttes d'eau. Ainsi, dit Gabriel Gilbert, « la pluie seule ne se forme jamais dans l'atmosphère ; ... la pluie n'est, en fait, que de la neige fondue ».

Affirmation nette et précise, mais qui ne trouva, à l'époque, aucune audience dans les milieux scientifiques officiels.

Fermons la parenthèse — sans autre commentaire — et poursuivons.

Depuis les années 30-40 les recherches se multipliaient et s'amplifiaient : ce furent les travaux d'Aitken sur les noyaux de condensation, ceux de Kohler sur le rôle des noyaux salins et les processus physico-chimiques de croissance des gouttelettes autour des noyaux hygroscopiques. Il y eut aussi les études de Nakaya sur les cristaux de glace, l'ouvrage fondamental de Dorsey sur les propriétés physiques de l'eau, les études de Volmer sur la cinétique des changements de phases qui furent à la base des recherches théoriques et expérimentales de Langmuir et ses collaborateurs, les contributions de Rau, Krastanov, Regener, Houghton et bien d'autres, et pour terminer, les travaux les plus connus du grand public : ceux de Langmuir et Schaefer et la découverte par Vonnegut des propriétés glaçogènes de l'iodure d'argent.

1.4. L'ÈRE DE « LA PLUIE PROVOQUÉE A L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE »

C'est en 1942, en effet, que le Dr Irving Langmuir, prix Nobel de physique, et son collaborateur le plus proche, Vincent Schaefer, avaient, à la demande de leur gouvernement, entrepris une série d'études portant sur les aérosols d'abord, puis s'étendant au givrage des ailes d'avions et, accessoirement, aux moyens de créer des brouillards artificiels pour dissimuler les mouvements de troupes en opérations.

Leur laboratoire se trouvait au sommet du mont Washington, à près de 2 000 m d'altitude, un endroit idéal, on en conviendra, pour observer *in situ* les nuages et brouillards dans leur formation et leur comportement. Et c'est en novembre 1946, il y a déjà — ou à peine — un peu plus de trente ans, qu'après une série d'expériences de laboratoire, en chambre froide, Vincent Schaefer, projetant d'un petit avion de tourisme quelques livres de glace carbonique sur un nuage dans l'ouest du Massachusetts, réussissait pour la première fois, et sans contestation possible, à « faire tomber de la neige artificielle ».

Cette expérience spectaculaire — qui marque le début de ce que l'on a pu appeler : l'ère de la pluie provoquée

à l'échelle industrielle — allait déclencher très vite, avec une poussée sensible de la recherche fondamentale, toute une série d'« opérations » sur le terrain.

La découverte par Bernard Vonnegut des propriétés glaçogènes de l'iodure d'argent ne fit qu'accélérer le mouvement, et l'on vit naître un peu partout dans le monde une étonnante floraison d'« opérations de déclenchement artificiel des précipitations ».

Certaines réussites, spectaculaires sans doute, mais parfois amplifiées par une presse toujours avide de sensationnel, frappèrent beaucoup l'imagination populaire. Mais on enregistrera aussi, sans toutefois le clamer sur les toits — un bon nombre d'échecs.

Partisans et détracteurs de la pluie artificielle allaient dès lors commencer à s'affronter. Il ne semble pas — ou du moins pas encore — que la querelle qui n'a cessé de les opposer soit près de s'éteindre.

II. LE PROBLÈME DE LA PLUIE PROVOQUÉE

Ainsi donc, après quelque vingt ou trente années d'expérimentations dans presque toutes les parties du monde, après des centaines, sinon des milliers de « contrôles » de toutes natures, l'efficacité réelle des opérations de déclenchement artificiel des précipitations reste encore très discutée.

S'il ne s'agissait, en l'occurrence, que de discussions entre braves gens, intéressés peut-être, mais incompetents parce que ne connaissant de la pluie artificielle que ce que peut leur raconter leur journal, cela n'aurait, après tout, qu'une importance minime : la pluie, naturelle ou artificielle, a été et restera toujours pour l'homme de la rue un excellent et inépuisable sujet de conversation.

Mais lorsque des divergences d'opinions, parfois très accusées, se manifestent parmi ceux qui passent pour être des « spécialistes de la pluie » cela devient plus grave ; car on conçoit quelle peut être, devant des avis opposés mais s'affirmant avec une égale énergie, la perplexité du dirigeant, de celui qui, pour prendre la décision de suspendre ou d'intensifier une campagne d'insémination des nuages, a tout de même besoin de savoir si, réellement, ces inséminations « font quelque chose ».

Ce doute stérilisant, né de la controverse entre « spécialistes » — le mot étant toujours entre guillemets — risque, si l'on n'y porte remède, de subsister longtemps encore ; car ce n'est pas l'accumulation de « preuves », d'ailleurs contradictoires, d'efficacité ou de non-efficacité des inséminations qui pourra emporter l'adhésion totale dans un sens ou dans l'autre.

Il semble donc que l'on soit dans l'impasse.

Mais toute l'histoire des sciences, pures ou appliquées, est ainsi faite de tâtonnements et de doutes. Dans la recherche — et c'est là une de ses caractéristiques — des problèmes nouveaux sont soulevés à chaque pas. Il peut y en avoir d'extrêmement complexes ; mais il n'en est point d'insolubles... à moins qu'ils n'aient été mal posés.

Il nous faudra donc voir, et avec toute l'objectivité requise en la matière, si cette irritante querelle qui oppose ceux qui croient à la pluie artificielle à ceux qui n'y croient pas, ne serait pas née, précisément d'un problème mal posé.

Un fait d'abord qu'il convient de rappeler — un fait indiscutable et d'ailleurs, indiscuté — est qu'il est certaines substances bien définies qui, dans des conditions également bien définies, peuvent avoir une certaine action (et même une action certaine) sur certains types de nuages ou de brouillards.

C'est ainsi, par exemple, qu'avec quelques menus fragments de glace carbonique introduits en chambre froide dans un brouillard de température et de teneur en eau données, il est possible de provoquer la formation de micro-cristaux de glace qui précipitent ensuite dans le fond de la cuve. C'est une précipitation que l'on peut, à proprement parler, qualifier d'« artificielle »... mais qui n'est tout de même pas ce que l'on a coutume de considérer comme « de la vraie pluie ».

Et la question se pose alors : si l'on est capable de provoquer en chambre froide la condensation — et donc la précipitation — de certains genres de « brouillards », sera-t-on capable également d'obtenir de semblables résultats — mais à une autre échelle — lorsque l'on passera de la simple expérience de laboratoire à une exploitation industrielle des techniques d'insémination de nuages réels ?

Et lorsque, après avoir ainsi « traité » quelques nuages, on verra, dans la meilleure des hypothèses, tomber vraiment de la pluie, comment pourra-t-on savoir — c'est la deuxième grande question qui se pose — si cette préci-

pitiation a bien été, en totalité ou en partie, la conséquence de l'intervention faite sur le nuage, ou s'il ne s'agissait que d'une pluie banale qui aurait bien fini par tomber toute seule ?

Il y a là, comme on le voit, deux problèmes, liés mais cependant distincts, et qui touchent :

- l'un aux *possibilités d'action*, c'est-à-dire aux techniques opératoires que l'on utilise pour tenter de provoquer ou d'accroître les précipitations, et à leur efficacité ;
- l'autre aux *possibilités de contrôle*, c'est-à-dire à l'efficacité des méthodes (statistiques ou autres) d'évaluation des résultats de ces opérations.

Cette dualité, qui n'a peut-être pas toujours été clairement exprimée — ni peut-être même pas toujours bien perçue, est de nature à expliquer ce qui, de prime abord, semblait inexplicable : ces divergences d'opinions qui se manifestent, parfois de façon si tranchée, sur la « valeur » des opérations de pluie provoquée. Physiciens, météorologistes, statisticiens et autres chercheurs, tous, à coup sûr, très compétents dans leur domaine propre, ne se sont pas privés — et c'était bien leur droit — de formuler sur la pluie artificielle des jugements « définitifs »... mais souvent contradictoires. Toutes questions de compétence, d'objectivité ou de probité intellectuelle mises à part, il semble à peu près certain qu'ils n'ont pas toujours dû parler de la même chose.

III. LES TECHNIQUES DE LA PLUIE PROVOQUÉE

3.1. SCIENCE PURE OU SCIENCE APPLIQUÉE

Il est une caractéristique commune à tous les hommes de science, ou à presque tous, c'est la tendance qu'ils ont à être « conservateurs », ce qui, au demeurant, est quelque peu paradoxal si l'on considère que le résultat le plus fréquent, et le plus marquant peut-être, de toute découverte scientifique n'est, en définitive, que d'apporter du changement.

Quels que soient l'époque ou le lieu, et dans quelque domaine que ce soit, les idées neuves ou les innovations technologiques ont toujours eu du mal à s'imposer. Et s'il en est certaines qui ont eu la chance — d'ailleurs toute relative — de n'avoir trouvé à leurs débuts qu'indifférence ou dédain, il en est bien d'autres qui se sont heurtées, et qui se heurtent encore, à une opposition farouche, pour ne pas dire à une intolérance pouvant aller parfois bien au-delà de ce scepticisme honnête et respectable qu'est le vrai « doute scientifique ».

Qu'en est-il en matière de pluie provoquée ?

Disons tout de suite, et en schématisant un peu, que si, en dépit de quelques légères réticences, « l'idée » d'une possibilité de modification (au moins partielle) du temps est aujourd'hui bien acceptée, « l'innovation » par contre, c'est-à-dire tout ce qui peut toucher, de près ou de loin, aux techniques opératoires et à leurs résultats, est encore loin d'avoir fait l'unanimité.

L'opposition qui se manifeste à l'égard de la « technologie de la pluie provoquée » vient essentiellement de ceux de ces hommes de science qui s'obstinent à demeurer enfermés dans leur tour d'ivoire, et que, pour la commodité du langage, nous appellerons des « scientifiques purs ».

A s'en tenir au sens strict du terme, cette opposition n'en est, en fait, pas une ; c'est, plus exactement, une attitude de refus. Pour des scientifiques purs soucieux de ne point se fourvoyer dans ce domaine impur qu'est la science appliquée, la technologie de la pluie provoquée est une question qui ne se pose et ne doit même pas se poser.

Leur raisonnement est simple. Il consiste à dire :

- 1) nos connaissances actuelles sur la physique de l'atmosphère restent encore très imparfaites (ce qui est d'ailleurs exact) ;
- 2) il est, en conséquence, prématuré de vouloir tenter de « faire de la pluie artificielle », alors qu'on sait si peu de choses encore (des hypothèses seulement) sur le mécanisme de déclenchement de la pluie naturelle ;
- 3) (et en conclusion) : une seule démarche est donc possible : se consacrer d'abord, et exclusivement, aux études théoriques de base, à la recherche fondamentale, et ce n'est « qu'après » que l'on pourra envisager (peut-être) d'opérer.

Certes, l'argument a du poids... ou il en a du moins, l'apparence.

Il ne viendrait, en effet, à personne l'idée de nier l'intérêt et l'utilité de la recherche fondamentale : un édifice, on le sait bien, ne peut tenir debout s'il ne repose pas sur une base solide. Mais que doit être, en fait, une étude dite

« théorique de base », et jusqu'à quel point peut-elle être poussée sans cesser de conserver ce glorieux qualificatif ?

Dans toute recherche scientifique, s'il y a bien, au départ, l'indispensable travail intellectuel, celui qui se fait dans le silence du cabinet, il y a aussi son complément — indispensable également — et qui est l'expérimentation. L'un ne saurait aller sans l'autre, et c'est ensemble, indissolublement liés, qu'ils constituent ce qui, réellement, est l'étude « de base ».

C'est ici « l'atmosphère » qui est notre sujet d'étude ; et ce sujet comporte deux volets : la physique de l'atmosphère et la dynamique de l'atmosphère (encore une dualité qui, elle aussi, est quelquefois perdue de vue...). A chacun de ces domaines particuliers d'étude — particuliers sans être toutefois indépendants — correspondra un type spécifique d'expérimentation :

- pour « la physique » ce seront essentiellement toutes les expériences que l'on peut faire au laboratoire telles que : essais en chambre froide de l'action de telle ou telle substance sur des brouillards de nature ou de composition diverses, études au microscope de la formation et l'évolution de micro-cristaux de glace ou de gouttelettes d'eau, etc. ;
- pour « la dynamique » : tout ce qui, par contre, ne peut se faire qu'en extérieur — et en vraie grandeur — dans l'atmosphère libre. Ce sera, par exemple, l'étude expérimentale des ascendances naturelles, ou celle de la diffusion, dans des conditions météorologiques données, de substances diverses émises de générateurs au sol ; ou encore — et finalement, peut-on dire, car elle constitue une sorte de synthèse de toute l'expérimentation antérieure — l'insémination de nuages réels, pouvant aller du simple essai d'intervention localisée sur tel ou tel type de nuages, jusqu'à la campagne complète d'insémination de grandes formations nuageuses — « l'opération », comme on l'appelle couramment — préparée, poursuivie et contrôlée avec toute la rigueur scientifique requise.

Or ces opérations, qui se comptent déjà par milliers, ce sont aujourd'hui, et sauf de rares exceptions, les rain-makers professionnels qui les pratiquent. Si, parmi elles, il en est certaines qui, conduites avec compétence, peuvent avoir été d'un intérêt scientifique indiscutable, à peu près toutes, cependant, en raison même de leur caractère commercial, resteront toujours un peu suspectes aux yeux des hommes de science qui, ne voyant en elles qu'empirisme sans valeur, y demeureront — on peut se demander jusqu'à quand — résolument opposés.

Seule, peut-être, une « opération sans but lucratif » entreprise par quelque organisme officiel à l'autorité scientifique reconnue, pourrait sembler de nature à vaincre leur opposition.

Mais rien n'est moins certain... car, en réalité, ce n'est pas telle ou telle opération — qu'elle soit à caractère scientifique ou à caractère commercial — mais c'est « le principe » même de l'opération qu'ils ne peuvent admettre.

Et ils ont, pour cela, les raisons que voici :

Une précipitation d'origine cyclonique, ou même une simple averse convective (pas si simple d'ailleurs) mettent en jeu des quantités d'énergie considérables. Il y a, par exemple, dans un beau cumulo-nimbus de 10 km de côté une puissance équivalente à quelque 3 milliards de kilowatt-heures, en gros 1 000 fois celle des centrales nucléaires actuellement en construction, ou — ce qui frappe peut-être encore plus l'imagination populaire — la puissance d'une dizaine de bombes du type Hiroshima.

Alors, face à ces énormes quantités d'énergie que la nature met en jeu, et qui se renouvellent inlassablement, comment peut-on imaginer qu'avec les moyens — infimes par comparaison — dont on dispose, on puisse arriver à pouvoir « faire quelque chose » ? C'est un peu comme si, armés de lance-pierres, on voulait s'attaquer à des engins blindés.

Que répondre à cela ?

Il nous faut bien admettre, tout d'abord, que la circulation atmosphérique générale qui creuse les dépressions, gonfle les anticyclones et transporte les masses d'air sur toute l'étendue des deux hémisphères met en jeu des énergies qui restent encore hors de notre portée.

Il nous faut reconnaître aussi que nous ne pouvons non plus, ni apporter au niveau des nuages l'humidité nécessaire aux condensations, ni créer l'instabilité qui, elle, est nécessaire au développement des nuages. En termes plus familiers, nous ne savons pas fabriquer des nuages, ni faire pleuvoir lorsque le ciel est bleu.

Il nous faut donc renoncer à cette illusion qu'il pourra être un jour possible de « faire de la pluie à volonté ».

Mais nous avons tout de même une autre possibilité : celle d'intervenir, lorsque les conditions s'y prêtent, sur les caractéristiques physiques de nuages déjà formés, de façon à déclencher le mécanisme qui amorcera la précipitation. Cette intervention — c'est-à-dire l'insémination du nuage — n'est, en fait, que le coup de pouce qui, en contribuant au déclenchement d'un mécanisme « naturel », provoque, par là même, un accroissement que l'on pourra qualifier d'« artificiel » des précipitations. Mais c'est un coup de pouce qui peut être d'une très grande efficacité.

Face à l'énorme puissance énergétique que contiennent les formations nuageuses auxquelles nous nous attaquons, nous ne pouvons jouer, avec nos « petits » moyens, que le rôle de catalyseur. Mais quand on sait tout ce qu'un catalyseur est capable de faire — le « bon » catalyseur, bien sûr, et employé comme il doit l'être — on ne peut que garder toute sa confiance dans l'avenir des techniques de la pluie provoquée.

3.2. LES PRÉCIPITATIONS « NATURELLES »

Il est, dès le départ, important de noter que ce que l'on désigne par « pluie artificielle » est autant le résultat du mécanisme de déclenchement de la « pluie naturelle » que celui — éventuellement — qu'une intervention humaine peut apporter. D'où il peut être déduit, en bonne logique, qu'avant de vouloir faire (avec quelque chance de succès) de la pluie artificielle, il faut d'abord « savoir » — au sens plein du terme — ce qu'est réellement une pluie naturelle.

Pour un observateur superficiel, la pluie, cette pluie familière si souvent attendue mais parfois redoutée, est un phénomène tout à fait banal.

Mais pourquoi pleut-il ? D'où viennent et comment se forment les gouttes d'eau, les flocons de neige, les grêlons ? Pourquoi pleut-il ici et pas là ? Pourquoi pleut-il plus, ou moins, ou pas du tout ?

Cela fait beaucoup de questions qui, toutes simples qu'elles puissent paraître, n'en sont pas moins d'une extrême complexité. S'il ne peut encore, en l'état actuel de nos connaissances, y être répondu de façon pleinement satisfaisante, notre acquis, dans le domaine de la dynamique et de la physique de l'atmosphère, a cependant pris aujourd'hui suffisamment de consistance pour pouvoir apporter aux travaux des « techniciens de la pluie provoquée » la base scientifique solide qui leur avait un peu manqué jusqu'à présent.

Ouvrant ici une parenthèse — qui peut avoir son importance — nous ferons maintenant un rappel, assez bref d'ailleurs, des données fondamentales indispensables à la compréhension des phénomènes qui ont leur siège dans l'atmosphère et qui constituent « le temps ». A certains, aux gens avertis, il pourra paraître superflu ; mais aux autres, il permettra de suivre plus facilement l'exposé des développements relatifs aux problèmes de la pluie, naturelle ou artificielle, et d'être à même, ensuite, de pouvoir en discuter avec plus de compétence — et d'objectivité — que n'en montrent généralement les pourfendeurs de la pluie provoquée.

3.2.1. La dynamique de l'atmosphère

Le « temps qu'il fait » en un lieu n'est pas dû — on l'oublie trop souvent — aux seules causes locales ; il dépend toujours de causes lointaines aussi bien dans le temps que dans l'espace. C'est ainsi par exemple que la température ou la pluie enregistrées aujourd'hui à Paris peuvent être des conséquences de l'avance d'un front actif commandé par une dépression au large de l'Islande. Elles peuvent être dues aussi à la présence d'un anticyclone sur le nord de la Russie, ou à toute autre cause du même genre.

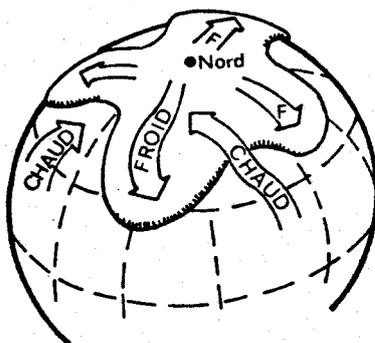


Fig. 1. — Principe général des échanges entre l'air arctique (froid et dense) et l'air équatorial (chaud et léger)

En matière de pluie, naturelle ou provoquée, c'est à l'échelle de l'atmosphère qu'il faut raisonner. C'est dire l'importance primordiale qu'il convient d'attacher à la « Météorologie dynamique » et, de façon plus précise, à l'étude synoptique des grands mouvements de l'atmosphère.

C'est à l'école norvégienne de Bjerknès que revient le mérite d'avoir proposé une hypothèse expliquant à la fois la genèse des familles de « perturbations » (cyclones et anticyclones) et la formation des masses nuageuses et de la pluie.

Pour Bjerknès les fluctuations de la situation météorologique sous nos latitudes moyennes sont dues au conflit incessant entre les invasions d'air froid issues des régions polaires et se dirigeant vers le Sud et des irruptions d'air humide et chaud partant de la ceinture des hautes pressions subtropicales pour se diriger vers le Nord.

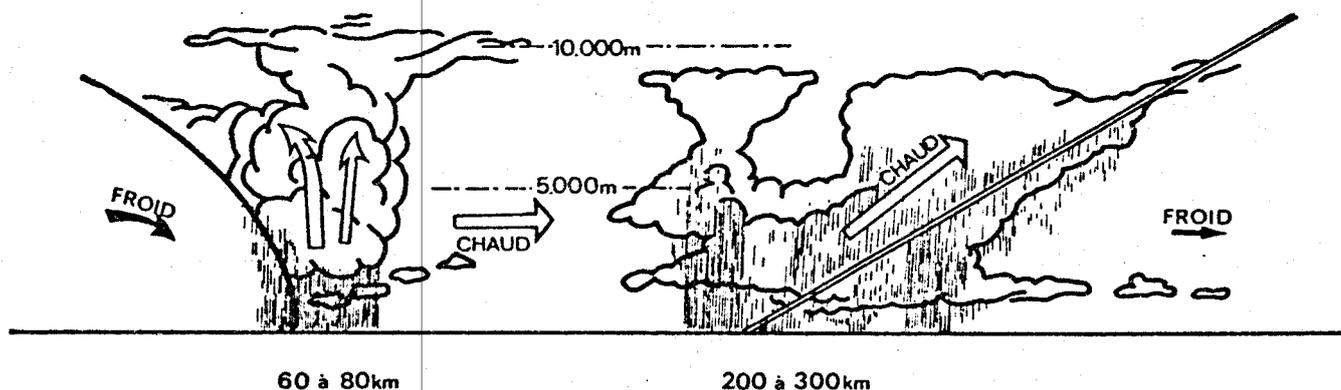


Fig. 2. — Coupe à travers des fronts

Lorsque ces courants aériens se rencontrent, leur surface de contact se distord en forme de vague dont la crête devient le centre d'une dépression qui se déplace vers l'Est. Sur la partie avant de cette zone dépressionnaire, ou zone cyclonique, l'air chaud et humide vient chevaucher la masse inférieure d'air plus froid et plus lourd : cette ascendance forcée provoque la formation d'une vaste zone nuageuse d'où tombent les premières pluies frontales liées à la perturbation. Sur la partie ouest de la zone dépressionnaire la masse d'air polaire froide s'introduit en biseau sous l'air chaud en le soulevant violemment et en provoquant de la sorte la formation d'une seconde bande nuageuse plus étroite mais donnant des précipitations plus intenses.

C'est le long de ces deux bandes pluvieuses que l'on a, comme on le verra plus loin, les plus fortes chances d'agir efficacement pour accroître les précipitations.

3.2.2. La physique de l'atmosphère.

Après cette description à grands traits de la circulation des masses d'air à l'échelle synoptique, il faut expliquer maintenant pourquoi certains nuages des systèmes dépressionnaires en mouvement donnent de la pluie et d'autres, pas. L'explication — récente, elle date des années 30 — est donnée par la théorie dite de Findeisen-Bergeron.

Schématiquement un nuage est formé de gouttelettes d'eau pouvant demeurer à l'état liquide en surfusion jusqu'à des températures de -25° , -30° et au-delà, d'un diamètre de 1 à 3 centièmes de millimètre, espacées de 1 mm environ les unes des autres, et plus ou moins soutenues, en raison de leur très faible poids, par la composante verticale ascendante des courants aériens.

Les gouttes de pluie sont considérablement plus grosses : leur diamètre moyen va de 0,5 à 2 mm ; leur poids est donc 100 000 à 1 million de fois supérieur à celui des gouttelettes constituant le nuage. C'est, pour donner une image, la différence relative qu'il peut y avoir entre une tête d'épingle et une grosse orange.

Pour qu'il y ait précipitation les gouttelettes doivent donc grossir de 100 000 à 1 million de fois, ce qui peut se faire soit par coalescence — c'est la réunion directe de plusieurs gouttelettes entre elles — soit par condensation suivant le mécanisme qu'explique la théorie de Bergeron.

De façon très schématisée cette théorie peut être formulée ainsi : dans les régions tempérées ou plus froides, un nuage ne peut précipiter que s'il contient à la fois de la vapeur d'eau, des gouttelettes liquides surfondues et des cristaux de glace.

On sait, en effet, qu'à une même température — négative — la tension de vapeur d'équilibre de la glace est inférieure à celle de l'eau surfondue : la différence, très faible au voisinage de 0° , atteint 20% à -20° . Si donc, dans une partie du nuage coexistent, avec la vapeur d'eau, des cristaux de glace et des gouttelettes surfondues, celles-ci se vaporiseront au profit des cristaux de glace devenus centres de condensation. La croissance et l'agglomération de ces cristaux forment des flocons de neige qui finissent par tomber vers le sol lorsque leur poids devient suffisant pour vaincre les courants ascendants qui les soutiennent. Ce sont ces flocons qui, par fusion au cours de leur descente à travers des couches plus chaudes de l'atmosphère, donnent finalement les gouttes de pluie.

Quant au mécanisme initial, celui de la nucléation, il ne se produit spontanément, si les gouttes d'eau sont rigoureusement pures, que vers -39° . Mais les courants ascendants entraînent toujours vers les parties hautes de l'atmosphère des particules microscopiques arrachées du sol et qui agissent comme noyaux de condensation naturels à des températures pouvant aller, suivant la nature de ces particules elles-mêmes, jusqu'aux environs de -12° .

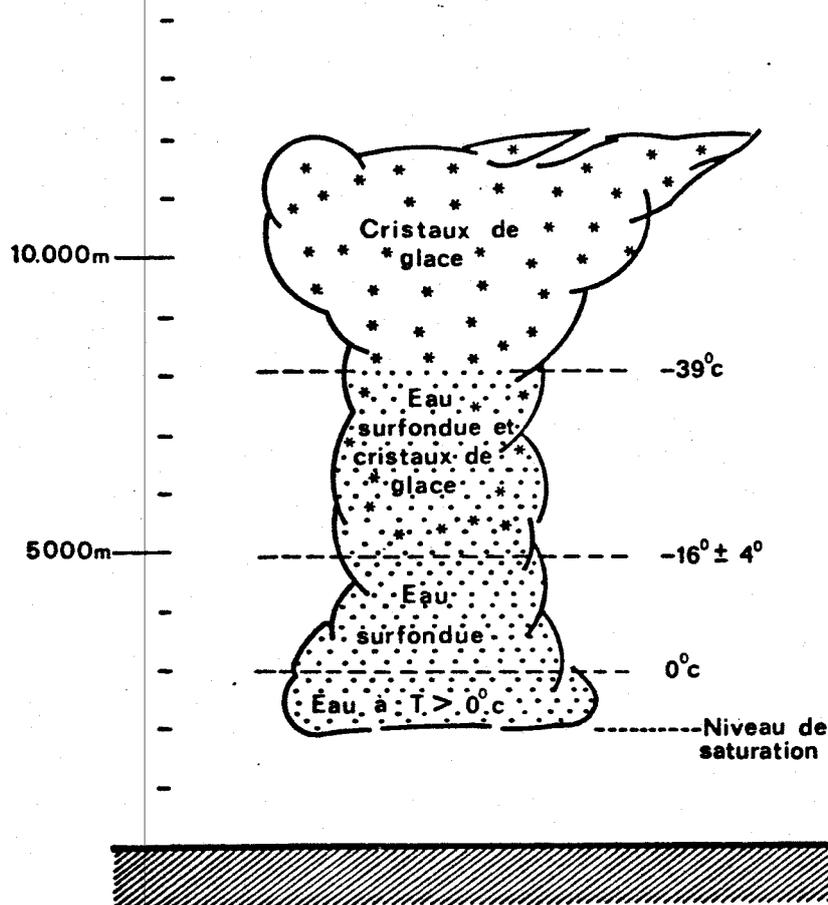


Fig. 3. — Coupe schématique d'un nuage

Ainsi ce sont des noyaux naturels qui amorcent, à l'intérieur du nuage surfondu, la formation de la phase glace. Le « mécanisme Bergeron » peut alors se déclencher et c'est, comme on l'a vu, ce qui donne naissance à la pluie.

On ajoutera, pour compléter ce bref rappel de nos connaissances actuelles sur la physique de l'atmosphère, que dans les régions tropicales ou subtropicales (ou parfois en été dans les régions à climat tempéré) un certain nombre d'averses proviennent de nuages dont la température n'atteint pas le point de congélation et à plus forte raison le seuil d'action des noyaux de condensation naturels, ce qui montre que la théorie de Bergeron n'est pas valable pour tous les cas.

Ces précipitations « de nuages chauds » seraient dues :

- soit à un processus de coalescence de gouttelettes de tailles diverses, la condition nécessaire au déclenchement d'un tel processus étant la coexistence d'un nombre élevé de très petites gouttelettes et d'un nombre plus réduit de gouttes plus grosses ;
- soit à un « effet de température » un peu comparable dans son principe à « l'effet Bergeron », et que l'on peut décrire ainsi : la tension de vapeur des gouttelettes en surfusion à température négative, varie, on le sait, avec la température. Si, donc, lorsque les ascendances sont fortes et le brassage de l'air important, des gouttelettes « froides » parviennent au voisinage de gouttelettes qui le sont moins, elles constitueront, par suite de leur inertie thermique, un facteur de croissance par effet de paroi froide. Cette croissance est rapidement stoppée à cause de la libération de chaleur latente de condensation, mais l'existence de mouvements ascendants est susceptible de prolonger le phénomène jusqu'à ce que la gravité l'emporte ;
- soit enfin à un « effet de solution ». Dans certaines conditions les « grosses » gouttes pourraient être dues à la présence de noyaux salins hygroscopiques provenant des océans et transportés à l'altitude des nuages par des courants atmosphériques ascendants, le mécanisme de croissance des gouttelettes en grosses gouttes s'expliquant ainsi : une gouttelette formée sur un noyau salin fortement hygroscopique (du chlorure de sodium ou simple sel marin, par exemple) a une tension de vapeur d'équilibre plus faible que celle d'une

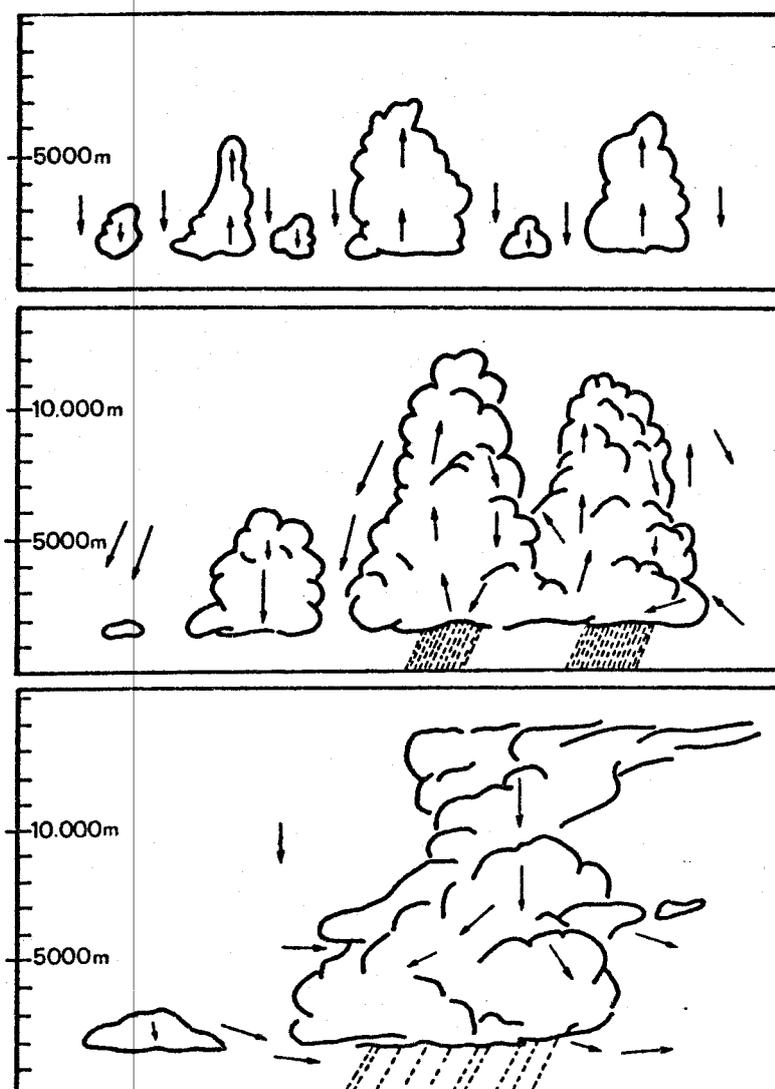


Fig. 4. — Naissance et évolution des « nuages chauds »

gouttelette formée sur un noyau de condensation « ordinaire », ce qui constitue — c'est toujours le même principe — un facteur de croissance. Il faut ajouter qu'à mesure que la goutte grossit, la concentration saline diminue et la croissance tend vers zéro.

C'est cette propriété qu'ont les noyaux salins d'abaisser la tension de vapeur des gouttelettes formées autour d'eux, qui est mise à profit pour l'attaque des « nuages chauds ».

3.3. LE DÉCLENCHEMENT ARTIFICIEL DES PRÉCIPITATIONS

3.3.1. Le principe

La seule vapeur d'eau contenue dans un nuage ne pouvant, lorsque sa température est supérieure à -12° , donner « normalement » des précipitations, le problème consiste donc à introduire dans les parties basses du nuage, les plus chaudes mais aussi les plus riches en humidité :

- soit des substances abaissant la température locale au-dessous de -39° qui est le seuil de glaciation spontanée ; ce furent les premières tentatives d'ensemencement des nuages avec de la glace carbonique dont la température est de -78° ;
- soit des substances susceptibles de produire la nucléation à des températures plus élevées que le seuil (-12°) à partir duquel peuvent agir certains noyaux naturels. Parmi ces substances utilisables, la plus efficace est l'iodure d'argent, dont l'une des variétés allotropiques cristallisant dans le même système que la glace, présente la particularité de provoquer la nucléation à partir de -4° . Ce sont donc les noyaux d'iodure d'argent qui, dispersés dans le nuage, en « activeront » la partie basse.

Quant aux nuages chauds, ceux dont le sommet se trouve encore à une température supérieure à -4° , ils peuvent être attaqués soit par ensemencement au chlorure de sodium, soit même dans certains cas par dispersion, dans le nuage, de gouttes d'eau ordinaires ayant les dimensions convenables. Ce genre d'opération n'est, en fait, pratiqué que tout à fait exceptionnellement dans nos régions tempérées.

3.3.2. L'exécution : matériels et techniques

Pour amener dans les nuages la glace carbonique, l'iodure d'argent, ou les noyaux salins, on peut utiliser : l'avion, les ballons et fusées, ou les générateurs au sol (en profitant des courants ascendants naturels). Il est, naturellement, possible de combiner les divers procédés pour choisir, dans chaque cas d'espèce, celui ou ceux qui seront les plus efficaces.

L'avion présente un avantage : il permet d'amener le produit utilisé à l'endroit précis que l'on a choisi. Mais en revanche, comme il ne peut s'y trouver que pendant un temps très court, il faudra, pour mener une opération à grande échelle, seule susceptible de produire un rendement économique appréciable, disposer de plusieurs avions prêts à voler en permanence de jour et de nuit. Les désavantages économiques et pratiques d'un tel déploiement de moyens sont évidents si l'on songe en particulier aux dangers que peuvent présenter certains vols au voisinage de cumulonimbus en pleine évolution ou au-dessus de régions montagneuses par temps bouché,

La glace carbonique ne peut cependant être amenée dans le nuage que par ce moyen : c'est ce qui explique pourquoi son utilisation — à l'échelle industrielle — comme agent de nucléation, a été à peu près totalement abandonnée.

L'emploi de l'avion sera donc limité à de l'expérimentation : ensemencement de nuages individuels (l'effet est parfois très spectaculaire), ou encore dispersion de noyaux de chlorure de sodium à la base des nuages chauds où ils seront pris dans les ascendances.

Les ballons et fusées n'ont aussi qu'un champ d'action trop restreint pour être industriellement utilisables.

Les cristaux d'iodure d'argent, de dimensions convenables et en nombre suffisant, ne peuvent être produits qu'à des températures de l'ordre de $1\ 300^{\circ}$. Certains expérimentateurs avaient songé à placer de l'iodure d'argent dans le corps d'une fusée explosive. Mais il a été reconnu que les hautes températures produites par l'explosion durent un temps trop court pour permettre la production d'un nombre suffisant de noyaux correctement calibrés et que la majeure partie de l'iodure d'argent est dispersée dans l'atmosphère sous la forme d'une poudre inefficace.

Dans le cas de noyaux salins ou de glace carbonique il est indubitable que l'utilisation des ballons ou fusées serait théoriquement possible. Mais un inconvénient majeur subsiste : la localisation des effets, qui conduit, pour y remédier, à un déploiement de moyens massif et exagérément coûteux.

Les générateurs au sol ont aussi leurs limitations, car il faut, pour amener dans les nuages les noyaux émis, qu'il existe des courants ascendants naturels dont la force et la direction doivent être prévus avec précision.

Les cristaux sont, en effet, produits sous forme de particules microscopiques (10^{12} à 10^{14} noyaux par gramme d'AgI vaporisé) assez légères pour flotter et être transportées dans les masses d'air en mouvement.

Si les dimensions, la trajectoire et la vie du panache de fumée émis peuvent être prédéterminés avec exactitude, il sera possible, grâce aux courants verticaux qui accompagnent toujours le développement de masses nuageuses importantes, de « placer » les noyaux actifs d'iodure d'argent à l'endroit le plus adéquat.

Les opérations à grande échelle couvrant de vastes étendues et se prolongeant jour et nuit, aussi longtemps que la situation météorologique le permet, peuvent ainsi être poursuivies à toute époque de l'année, et produire — mais n'anticipons pas — des accroissements de précipitations d'un intérêt économique considérable en raison du prix raisonnable de la production des noyaux d'iodure d'argent par les générateurs au sol.

Quelques mots maintenant sur les générateurs eux-mêmes, et d'abord sur ce qui leur est demandé :

L'iodure d'argent se présente sous la forme d'une poudre jaunâtre de densité voisine de 4, et d'apparence inerte ; mais on ne l'utilise pas tel quel. Afin de réaliser la dimension et le type de germe le plus efficace pour la nucléation, cette « poudre » d'iodure d'argent doit être vaporisée à haute température (l'optimum est à $1\ 300^{\circ}$) et les vapeurs obtenues peuvent être brusquement refroidies. C'est ce que doivent être capables de faire les générateurs.

Il en existe de plusieurs types. Sans entrer dans des détails de construction ou de fonctionnement qui ne peuvent intéresser que le « spécialiste » nous rappellerons seulement que :

- ① Gouttelettes d'eau surfondues inoculées par AgI .
(Croissance des cristaux hexagonaux)
- ② Cristaux de glace s'agglomérant en flocon de neige.
- ③ Gouttes de pluie provenant de la fusion des flocons de neige.

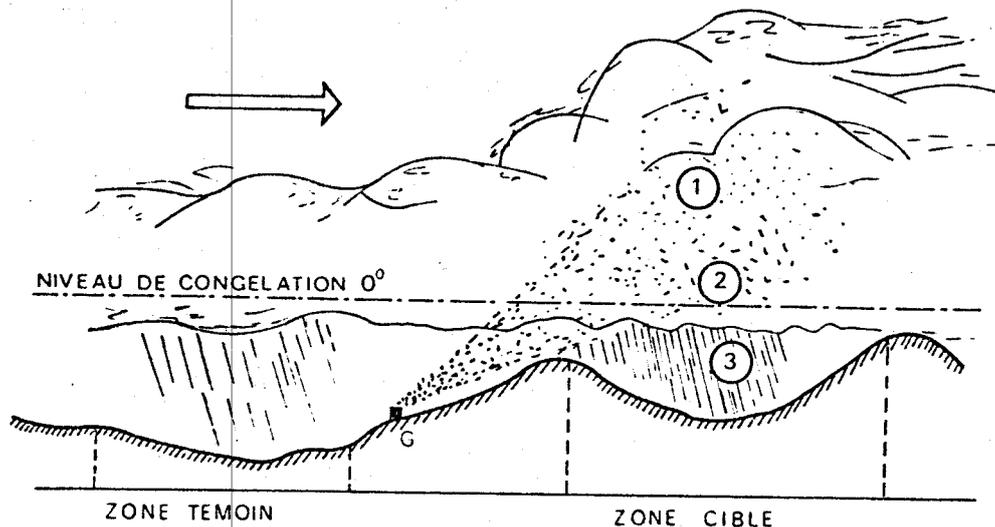


Figure 5

- la plupart des générateurs utilisent un combustible (coke métallurgique ou charbon) imprégné d'iodure d'argent préalablement dissous dans l'acétone à une concentration de 2 à 5% ;
- dans un autre type d'appareil c'est la solution acétonique d' AgI qui est brûlée dans une flamme de propane ;
- on peut enfin (troisième variante) vaporiser directement l'iodure d'argent dans un four électrique.

En alimentant le générateur, quel qu'en soit le type, à une cadence correspondant à la vaporisation de 30 g d'iodure d'argent à l'heure, on réalise un taux d'émission convenable pour la plupart des conditions d'utilisation. On a observé cependant que certains noyaux d'iodure d'argent ainsi dispersés dans l'atmosphère semblaient se désactiver sous l'influence de causes diverses mais encore assez mal précisées : humidité, lumière, ou façon même dont les noyaux ont été produits. A cet égard, c'est le générateur à coke imprégné qui est généralement considéré comme celui qui donne les noyaux dont la durée de vie est la plus longue, et qui sont les plus efficaces.

Ainsi parvenus au terme de ce bref — mais indispensable — rappel de « ce qu'il faut savoir » sur la pluie naturelle ou artificielle, nous noterons, pour ne retenir que l'essentiel :

- 1) que la pluie dite « artificielle » est autant le résultat du déclenchement du mécanisme de la pluie naturelle que celui qu'une intervention humaine peut éventuellement lui apporter ;
- 2) que, pour qu'il pleuve « naturellement » il faut que soient remplies les conditions suivantes :
 - un courant ascendant dans l'air humide, pour créer le nuage,
 - une cause physique capable de pouvoir déranger l'état d'équilibre colloïdal du nuage, en particulier la coexistence des trois phases liquide-solide-vapeur,
 - un remplacement continu (par un mécanisme de convergence) de l'humidité précipitée, pour que la quantité de pluie produite par le nuage ait une valeur appréciable ;
- 3) qu'une opération de déclenchement artificiel des précipitations ne peut avoir de résultat positif que :
 - si, d'abord, des nuages « convenables » existent,
 - et si, en second lieu, l'ensemencement, qui vise à créer ou à faciliter les conditions de rupture d'équilibre dont il vient d'être parlé, a pu être fait dans la partie du nuage où se trouve la densité requise de contenu en eau.

Cela étant, il pourra apparaître à certains que, tous comptes faits, il ne doit pas être si difficile de « faire pleuvoir ».

C'est aller un peu vite en besogne, car si les techniques d'insémination des nuages paraissent, effectivement, en elles-mêmes assez simples, encore faut-il savoir — et on ne saurait trop insister sur ce point — quand et comment, bien les utiliser.

3.3.3. La conduite d'une opération

Il est naturellement toujours possible — et c'est ce que l'on voit faire encore quelquefois — d'organiser sur le plan local des essais de déclenchement artificiel des précipitations en utilisant, en raison de leur facilité d'emploi, des générateurs au sol.

L'expérience a montré que c'est là une méthode qui ne peut conduire à aucun résultat valable. Laisser à l'exécutant local l'initiative de déclencher ses émissions lorsqu'il voit apparaître un nuage, c'est un peu comme si on pensait pouvoir gagner une guerre en ne donnant à chaque combattant que la consigne d'attaquer l'ennemi partout où il le rencontrerait.

On sait cependant fort bien, et sans être pour cela un grand stratège, que le moyen le plus efficace de vaincre l'adversaire est d'organiser un « Bureau central d'opérations » qui rassemble les informations de toutes natures, les coordonne, les analyse et envoie à chaque unité combattante les directives les mieux appropriées.

De la même façon, le moyen le plus sûr — et en même temps le plus économique — d'obtenir le maximum de résultats d'une campagne de déclenchement artificiel des précipitations, consiste aussi à organiser un Bureau central d'opérations, tenu par du personnel expérimenté et consacrant toute son activité à la poursuite de l'opération.

Recueillant jour et nuit, par télétype ou par radio, toutes les informations météorologiques au sol et en altitude diffusées par l'ensemble des postes du réseau synoptique mondial, ajoutant à ces « renseignements lointains » ceux que lui fournissent des observateurs stationnés au voisinage ou sur la zone d'opérations, il est en mesure de suivre en permanence l'évolution dynamique et physique des masses d'air en mouvement, de prévoir le moment où les conditions seront favorables sur la cible, et en coordonnant l'emploi de tous les moyens disponibles, déclencher enfin les émissions avec le maximum d'efficacité.

Il ne reste plus, après cela qu'à contrôler les résultats.

C'est apparemment la partie la plus simple de l'opération ; c'est cependant celle qui prête le plus à discussions et à controverses.

IV. LE CONTROLE DES RÉSULTATS

De même qu'il est à la portée du premier venu de jouer au « faiseur de pluie » en faisant brûler dans un quelconque générateur un peu d'iodure d'argent, de même tout un chacun — s'il a, ne serait-ce qu'une vague teinture de calcul statistique, et à plus forte raison s'il est déjà ce que l'on appelle un statisticien distingué — se sent parfaitement capable de « contrôler l'opération ».

Mais là aussi, comme dans la phase opérationnelle d'une campagne de déclenchement artificiel des précipitations, il ne suffit pas, lorsqu'on en est à la phase « contrôle des résultats », d'avoir en mains l'outil, il faut savoir aussi quand et comment utiliser cet outil. Et puis se rendre compte, ce qui n'est pas le moins important, de ce que l'on fait exactement... car il y a, comme on va le voir, contrôle et contrôle.

4.1. LES DEUX ASPECTS DU CONTROLE

Le rainmaker — pour ne pas dire le « faiseur de pluie », un terme par trop péjoratif — le rainmaker, donc, celui qui a la responsabilité du déclenchement effectif des émissions, se trouve souvent placé devant un dilemme : bien que conduisant, en principe, son opération dans des buts d'intérêt économique — obtenir le maximum de précipitations sur la cible — il doit aussi démontrer dans un temps aussi court que possible, l'efficacité de son travail.

Ainsi, par honnêteté pour son contrat, il profitera de toutes les occasions qui se présentent pour augmenter,

de si peu que ce soit, les précipitations. Mais, ce faisant, il opère souvent par situations marginales ou faibles qui ne lui permettent pas de faire le plein usage de ses possibilités.

Ces résultats « marginaux » étant cependant inclus dans les évaluations globales faites en fin d'opération, il peut arriver que le résultat final se trouve ainsi ramené au-dessous du seuil à partir duquel la preuve de l'efficacité des inséminations peut être considérée comme statistiquement établie.

Il convient donc de distinguer deux genres de contrôle :

- d'une part, celui que l'on effectue pour rechercher cette preuve de l'efficacité : on ne doit considérer, dans ce cas, que les résultats enregistrés au cours des seules périodes où le potentiel de productivité était maximum, ceci pour éviter que l'effet ne soit masqué par les résultats plus faibles obtenus en conditions plus marginales ;
- d'autre part, le contrôle d'ensemble où toutes les inséminations sont prises en compte et qui est, à proprement parler, « l'évaluation » permettant de faire le bilan de l'opération et d'en apprécier la rentabilité.

Mais il est, en fait, extrêmement rare que l'on songe à faire cette distinction.

Un contrôle sur l'ensemble de l'opération — tel qu'on le pratique d'habitude — ne peut, sauf cas exceptionnels, apporter « aussi » la preuve mathématique du succès. C'est ce que traduit, fort bien d'ailleurs, cette conclusion que l'on trouve dans tant de rapports de contrôle : « Résultats encourageants, mais statistiquement non significatifs ». Et si le doute subsiste encore, dans certains esprits, sur l'efficacité réelle des inséminations, c'est essentiellement à cette confusion dans la nature et la portée des divers types possibles de contrôle qu'on le doit.

Une dernière remarque : « contrôler une opération » c'est, en termes très généraux, essayer de se rendre compte, par une évaluation quantitative, c'est-à-dire chiffrée, des effets qu'a pu éventuellement avoir l'action que l'on a exercée sur les nuages.

A travers les méthodes, statistiques ou autres, les plus diverses et les plus élaborées, « on teste l'opération », ou c'est, du moins ce qu'on croit faire. Mais il faut bien se rendre compte qu'en même temps, « on teste aussi l'opérateur ».

Une comparaison, faite dans un domaine plus familier que celui de l'attaque des nuages, illustrera ce propos.

Supposons que l'on ait envie d'acheter une arme, une carabine, par exemple. La première chose à faire sera de s'assurer du bon fonctionnement de cette carabine. Et l'on fera pour cela une série de tests dont le plus simple est de placer une cible devant soi et d'y envoyer un certain nombre de balles.

On comptera ensuite le nombre d'impacts sur la cible, on le comparera au nombre de balles tirées, et suivant le pourcentage obtenu — ce qui est de la statistique, simple, bien sûr, mais de la statistique quand même — on dira, si ce pourcentage atteint, par exemple, un certain seuil que l'on s'était fixé à l'avance, que l'arme utilisée est « bonne » puisqu'elle aura permis d'obtenir de bons résultats.

Mais ce jugement que l'on porte ainsi sur l'efficacité de la carabine — et, croit-on, uniquement sur cette efficacité — risque d'être totalement modifié si l'arme que l'on voulait tester a été mise entre les mains d'un maladroit. Si le pourcentage des balles placées dans la cible est faible, on dira, ou on sera tenté de dire, que l'opération n'a pas réussi.

Il en est exactement de même pour le contrôle des opérations de pluie provoquée. Lorsqu'il est dit, dans certains rapports, que « les résultats » ne sont pas fameux, ou, en termes plus savants, qu'ils ne sont pas statistiquement significatifs, c'est peut-être possible. Mais il est également possible que, si le résultat a été médiocre ou mauvais, c'est peut-être « aussi » parce que l'opérateur n'a pas su opérer.

4.2. LE CONTROLE : POSSIBILITÉS ET LIMITATIONS

Certains d'entre nous ont pu être appelés à participer à des contrôles d'opérations de pluie provoquée. D'autres le seront peut-être un jour ou auront en mains des rapports sur le contrôle de l'efficacité de telle ou telle opération ; il faudra, dans ce cas, qu'ils soient à même de juger dans quelles conditions le contrôle a été effectué, et quelle est, en conséquence, la confiance qui peut être accordée aux conclusions du rapporteur.

De toute façon, et comme on l'a fait à propos des techniques opératoires — un rappel des notions indispensables à la compréhension des phénomènes qui régissent la pluie naturelle ou artificielle — il ne sera donc pas inutile de rappeler, brièvement aussi, « ce qu'il faut savoir » sur les méthodes de contrôle les plus couramment utilisées.

4.2.1. Le principe

La seule donnée dont on dispose pour contrôler l'efficacité d'une opération est la hauteur de précipitation H observée en une ou plusieurs stations pluviométriques de référence sur la zone-cible et aux alentours.

Deux modes de raisonnement sont possibles :

4.2.1.1. On peut, si l'on dispose de relevés pluviométriques suffisamment anciens, évaluer quelle aurait été la probabilité d'apparition « en conditions naturelles », c'est-à-dire sans insémination, de la hauteur de pluie observée H .

Pour préciser : on se fixe un certain seuil S (5% — 2% — 1%... d'autant plus bas que l'on exige un contrôle plus sévère). A ce seuil correspond, sur la courbe des précipitations classées, une certaine valeur H' de la précipitation.

Si, alors, la hauteur de pluie observée H est supérieure à H' , c'est, sinon une preuve, du moins un indice favorable du succès de l'opération, que l'on peut d'ailleurs chiffrer en probabilité.

Mais si l'on tient compte :

- de la grande variabilité de la pluie naturelle,
 - du fait que le seuil S de signification est en général fixé assez bas (1 à 2%),
- on n'observera une hauteur de pluie supérieure à H' que dans des conditions exceptionnelles.

En pareil cas, le caractère exceptionnel du phénomène devient tellement visible qu'il n'est peut-être plus besoin de calcul de probabilités pour le démontrer.

Le cas le plus fréquent est celui où H observé est inférieur à H' . Mais c'est aussi celui où la probabilité d'apparition d'une valeur telle que H dans la gamme des « valeurs courantes » perd toute signification statistique. Cela ne veut pas dire forcément que les inséminations n'ont eu aucun effet, mais tout simplement que, s'il y en a eu un, il n'est pas possible — par cette méthode — de le mettre en évidence.

Au total : méthode de contrôle de peu d'intérêt lorsque les précipitations sont exceptionnelles, et inefficace si elles sont seulement « moyennes ».

4.2.1. L'autre mode de raisonnement consiste à regarder la précipitation H enregistrée sur la cible comme la somme de deux termes :

- la précipitation « naturelle », N
- et le supplément artificiellement provoqué A (A pouvant être positif, nul, et éventuellement négatif).

Si N est connu — H ayant été effectivement mesuré — le succès (ou l'échec) de l'opération sera caractérisé sans ambiguïté par la valeur de : $H - N$.

Tout le problème du contrôle revient donc à évaluer N .

Une évaluation « précise » est difficile à obtenir ; ce n'est qu'une « valeur moyenne » de N que l'on pourra calculer en général.

D'où la nécessité :

- de rechercher entre quelles limites N_1 et N_2 doit se situer N ,
- de resserrer ces limites le plus possible.

Les méthodes que l'on utilise pour y parvenir sont basées à peu près toutes sur le même principe très général de la comparaison entre cible et témoin.

A cet effet, on associe à la zone-cible — c'est-à-dire celle où l'on cherche à obtenir un accroissement des précipitations — une zone dite « témoin » soumise aux mêmes influences météorologiques générales, mais dont on est sûr qu'elle n'a pu être influencée par les inséminations (en raison, par exemple, de la position géographique qu'elle peut occuper à l'amont des générateurs).

Les deux séries d'observations recueillies « avant l'opération » simultanément sur les pluviomètres de la zone-cible et sur ceux de la zone-témoin, permettent, par les procédés classiques du calcul statistique, de calculer la corrélation qui les lie. C'est cette corrélation « de base » qui servira, par la suite, à déterminer, en partant des observations faites sur la zone-témoin (toujours non influencée) celles que l'on aurait dû normalement enregistrer sur la cible s'il n'y avait pas eu d'inséminations.

Cette valeur qui est, par le fait, celle que nous avons appelée : la précipitation « naturelle » N sur la cible, est une valeur moyenne prise sur la droite de régression. Aux écarts liés, dont le nombre caractérisera la sévérité du contrôle, correspondent ces limites N_1 et N_2 dont il a été question et entre lesquelles se situe la précipitation naturelle N que l'on cherchait à évaluer.

4.2.2. Les données de base

Pour le contrôle des résultats d'une campagne de déclenchement artificiel des précipitations, et quelle que soit la nature de ce contrôle, ce que l'on utilise comme « données de base » — et, peut-on dire, comme seules données — ce sont les hauteurs d'eau relevées dans les stations pluviométriques de référence avant, pendant, et après l'opération.

Ce sont des données qu'il est, en principe, très facile d'obtenir : la mesure d'une hauteur d'eau recueillie dans

un pluviomètre ne présente, en effet, pratiquement aucune difficulté. Mais en fait — et supposant prises toutes les précautions voulues — cette mesure est-elle vraiment représentative de la précipitation réelle ?

Quoi que l'on puisse faire, il existe, et il existera toujours entre la hauteur d'eau recueillie par le pluviomètre et celle qui s'est effectivement abattue sur le sol, un certain écart, qui caractérise d'ailleurs « la précision de la mesure pluviométrique ». On peut alors se demander — et cela touche directement à notre problème du contrôle des résultats d'une opération — comment il pourra être possible de déceler une augmentation « artificielle » de précipitation, disons de $x\%$, si la précision dans la mesure elle-même de cette précipitation n'est pas assurée à moins de $x\%$.

Toute une littérature pourrait être rassemblée sur les mesures pluviométriques et les nombreux problèmes qu'elles posent. Il n'est naturellement pas question d'en reprendre ici le détail ; mais il ne sera tout de même pas inutile — ne serait-ce qu'en raison du regain d'intérêt qui semble se porter sur la pluie provoquée et son contrôle — de rappeler ce qu'il y a à en retenir d'essentiel.

4.3. LA PRÉCISION DES MESURES PLUVIOMÉTRIQUES

4.3.1. La mesure de la précipitation en une station (ou mesure « ponctuelle »)

On sait — ou on devrait savoir — qu'il n'existe aucun pluviomètre capable de mesurer exactement la quantité de précipitation arrivant au sol. D'où les écarts dont nous avons déjà parlé entre « quantité mesurée » et « quantité vraie ». Ces écarts, que certains appellent des « erreurs de mesure » sont dus à des causes diverses, les unes liées à l'appareil de mesure lui-même et à son environnement, les autres à la nature intrinsèque de la précipitation.

Ce sont les effets du vent qui constituent, et de loin, la source la plus importante d'erreurs de mesure. On peut en considérer sous deux aspects :

- les effets du vent sur l'instrument lui-même,
- les effets du site sur les trajectoires des filets d'air.

a) Un pluviomètre placé (comme il l'est habituellement) dans le vent constitue un obstacle qui modifie le champ des vitesses des molécules d'air en mouvement, ce qui a pour effet de défléchir, au voisinage de l'appareil, les trajectoires des gouttes de pluie. Un certain nombre de ces gouttes — d'autant plus élevé que leur taille, donc leur poids, est plus faible, et que le vent est plus violent — sont ainsi déportées hors de la surface réceptrice du pluviomètre, ce qui a finalement pour résultat de sous-estimer la valeur de la quantité de pluie que l'on veut mesurer.

Les erreurs dues aux effets du vent peuvent atteindre des valeurs assez considérables. Pour fixer les idées : on a pu estimer qu'en moyenne, la correction à apporter à un total annuel de précipitations (constituées de pluie et de neige) sur un territoire étendu peut varier de 10 à 40%. Mais on doit dire aussi, en contrepartie, que ces erreurs peuvent être, sinon annulées, du moins sensiblement atténuées par l'emploi de dispositifs spéciaux tels que : forme aérodynamique donnée au pluviomètre, utilisation d'écrans ou de grillages « protecteurs », etc.

b) Un autre aspect de l'influence du vent est, comme on l'a déjà indiqué, celui des effets du site sur les trajectoires des filets d'air et donc, des gouttes de pluie. Il peut arriver, dans certains cas, que ces effets soient plus importants que ceux liés au pluviomètre lui-même. On peut y remédier de façon satisfaisante par un placement astucieux de l'appareil par rapport aux obstacles (constructions, rideaux d'arbres...) avoisinants.

4.3.2. Évaluation de la précipitation reçue sur une surface

Il semble tout naturel d'admettre — sans le dire explicitement — que la précipitation moyenne reçue sur une surface, ou sur un bassin, peut être « correctement » définie à partir des précipitations mesurées dans les stations isolées qui équipent le bassin.

Il y a diverses façons de traiter ces mesures « ponctuelles ». On peut :

- soit en faire simplement la moyenne arithmétique,
- soit user (mais sans en abuser) de la méthode dite de Thiessen, ce qui revient, en somme, à faire une moyenne d'observations pondérée,
- soit enfin (ce qui est préférable) tracer des isohyètes et planimétrer les éléments de surface compris entre deux isohyètes successives.

Mais, ce faisant, on admet plus ou moins implicitement que :

- l'échantillon qui a été mesuré en chacune des stations ponctuelles est vraiment représentatif de la quantité d'eau réellement tombée sur la portion de surface entourant la station.
- que la pluie sur cette « surface représentative » est régulièrement distribuée — ce qui est en contradiction avec ce qui se passe effectivement.

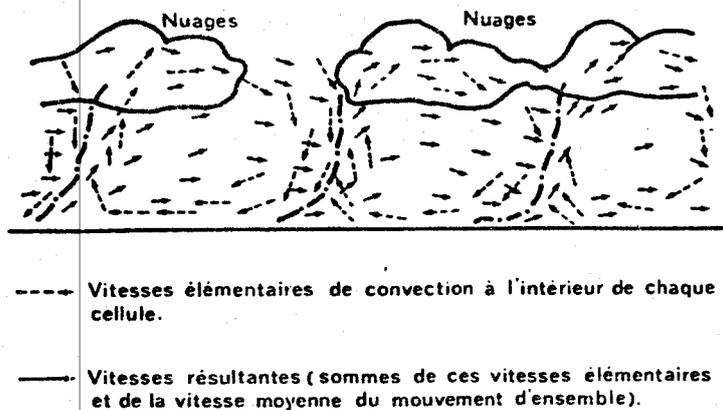


Fig. 6. — Coupe verticale de « cellules d'air » en mouvement

Il a pu être observé, en effet, que deux pluviomètres identiques, placés à très faible distance l'un de l'autre (de l'ordre du mètre, à peine) n'indiquent pas des hauteurs de précipitations identiques. Un écart, plus ou moins marqué, se manifeste à tous coups.

Il ne s'agit plus ici de cet écart dont on a longuement parlé — celui qu'il peut y avoir entre quantité de pluie mesurée et quantité réellement tombée — mais d'un autre genre d'écart apparaissant entre deux mesures dont il était normal d'attendre qu'elles donnent le même résultat. Pour aussi surprenant qu'il puisse paraître, il peut cependant s'expliquer ainsi :

Le mouvement de l'air au voisinage du sol n'est pas un écoulement stable, mais consiste en une succession de bouffées et de calmes relatifs qu'accompagnent de petits changements de direction. Ces variations rapides, que l'on perçoit nettement sans, d'ailleurs, avoir besoin de faire, pour cela, aucune mesure spéciale, font sentir leurs effets sur les trajectoires des gouttes de pluie qui arrivent ainsi au sol par rafales irrégulières dans le temps et dans l'espace. Et c'est cette « irrégularité intrinsèque des précipitations » que traduit la non-identité des indications de notre couple de pluviomètres voisins et identiques.

On a cherché, naturellement, à chiffrer l'importance de « l'erreur » qu'elle peut ainsi introduire dans une mesure ponctuelle : en admettant que la précision d'une mesure en une station simple puisse être caractérisée par l'écart entre l'indication qu'elle donne, et celle constituée par une moyenne qui serait obtenue à partir des indications d'un très grand nombre de stations voisines, il a pu être établi, expérimentalement, que l'écart ou « erreur à craindre » dans une mesure pluviométrique ponctuelle est de l'ordre de :

$$\begin{aligned} & \pm 15 \text{ à } 18\% \text{ pour une mesure journalière} \\ & \pm 5 \text{ à } 7\% \text{ pour un total mensuel} \\ & \pm 1,5 \text{ à } 2\% \text{ pour un total annuel.} \end{aligned}$$

Ce ne sont là, faut-il le rappeler ? que des ordres de grandeur ; mais il sera bon de les avoir en tête dans toute étude ou discussion où il pourra être question d'observations pluviométriques.

Après cette grande parenthèse — et supposant maintenant résolu (ou parvenu à un stade suffisamment avancé) le problème de la mesure des précipitations — revenons à notre sujet central : le contrôle des résultats d'une opération.

4.4. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CONTRÔLE POSSIBLES

Si le principe — la comparaison entre cible et témoin — est commun à toutes les méthodes de contrôle utilisées, les variantes sont nombreuses.

Elles seront exposées dans ce qui va suivre.

Mais il est, au préalable, un point sur lequel il convient d'attirer l'attention : c'est le danger de se limiter à une méthode de contrôle unique alors même qu'elle se présenterait sous un aspect « scientifique » à première vue rassurant.

A la question : combien l'opération a-t-elle donné de millimètres d'eau supplémentaires ? question quantitative,

il faut évidemment une réponse quantitative, et c'est par la voie du calcul mathématique et de la statistique appliquée qu'on l'obtiendra.

On ne doit pas oublier cependant qu'un programme de déclenchement artificiel des précipitations se place dans un « cadre naturel » qui est un ensemble très complexe de paramètres nombreux et variables constituant le temps. Les lois mathématiques — rigoureuses par essence, alors que les lois naturelles sont plus souples — ne permettent pas de porter, seules, un jugement définitif sur la valeur d'une opération. Il est donc nécessaire de leur associer d'autres procédés d'interprétation plus « physiques » pour replacer les résultats d'une statistique trop exclusive dans le cadre de la réalité de l'espace et du temps.

Voyons maintenant quelles sont les méthodes de contrôle — « physiques » ou « mathématiques » — que l'on utilise le plus couramment.

4.4.1. Les méthodes « physiques » : l'analyse météorologique

La pluie est due, comme on l'a vu, à l'action conjuguée d'un certain nombre de facteurs, les uns de nature physique (température et humidité de l'air aux différents niveaux, nombre et nature des noyaux de condensation...), d'autres de nature dynamique (position et trajectoires des centres d'action, mouvement des masses d'air, formation des ascendances orographiques, ou frontales, ou convectives, etc.).

Ces facteurs, extrêmement fluctuants, n'ont pas tous et toujours la même importance ; à chacun d'eux on peut attribuer un poids, qui d'ailleurs, et suivant les circonstances, est lui-même variable.

L'analyse d'un certain nombre de situations météorologiques et celle des précipitations associées à chacune de ces situations doivent permettre d'établir les relations qui lient telle ou telle quantité d'eau précipitée, à la présence, et à l'importance de tel ou tel facteur.

Ce sont ces « relations » qui constituent la base du contrôle météorologique en apportant une solution directe au problème général du contrôle qui, rappelons-le, se pose schématiquement ainsi : la précipitation H observée sur la cible étant regardée comme la somme d'une précipitation « naturelle » N et d'un suppléant « artificiel » A , évaluer N .

On en a ici une évaluation déduite de lois physiques. La comparaison avec la précipitation H effectivement mesurée, permettra de juger, suivant la valeur de $H - N$, du succès — ou de l'échec — de l'opération.

Telle est, en gros, la méthode de contrôle météorologique. Très simple en principe, elle comporte cependant, dans son application pratique, de très sérieuses difficultés.

Il n'est, en effet, pas commode — c'est le moins qu'on puisse dire — de déceler, dans cet ensemble composite qu'est une « situation météorologique », tous les facteurs divers, fugitifs, et plus ou moins enchevêtrés, qui régissent la formation de la pluie ; et il est plus difficile encore, d'avoir de chacun d'eux, une mesure quantitative précise.

Vouloir, à partir d'éléments si malaisément accessibles, déterminer la valeur N de la précipitation qui leur est théoriquement associée, paraît ainsi être une tâche extrêmement ardue. Elle ne comporte cependant aucune « impossibilité fondamentale » ; et l'on conçoit fort bien qu'il soit toujours possible de déterminer, sinon la valeur N elle-même, du moins les limites N_1 N_2 entre lesquelles elle doit se situer, l'objectif final étant alors de resserrer au maximum l'intervalle N_1 N_2 .

Il faut reconnaître honnêtement qu'en l'état actuel de nos connaissances sur l'atmosphère, cet intervalle reste encore trop étendu pour qu'il soit possible d'envisager, par la seule approche météorologique, un contrôle pratique et sûr des résultats d'une opération.

Mais cela ne signifie, en aucune façon, qu'il faille systématiquement tenir « la Météorologie » à l'écart du contrôle. Elle a, au contraire, un rôle de tout premier plan à y tenir, même et y compris dans les méthodes dites : mathématiques ; mais elle devra alors être considérée sous un autre aspect dont on reparlera plus loin.

4.4.2. Les méthodes « mathématiques » : l'analyse statistique

S'il est incontestable qu'en matière de contrôle des résultats d'opérations de pluie provoquée, l'approche statistique a attiré plus de chercheurs qu'aucune autre méthode, il est douteux que l'on puisse affirmer que les résultats obtenus aient bien été en rapport avec tous les efforts effectués.

Il y a plus de cent ans déjà, en 1865 (et avant même qu'il ne soit question du contrôle de la pluie provoquée). Claude Bernard disait, dans son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* : « On ne fait de la statistique que parce qu'on est dans l'impossibilité de faire autrement, car jamais la statistique, suivant moi, ne peut donner la vérité scientifique et ne peut constituer, par conséquent, une méthode scientifique définitive. »

« L'état statistique, comme l'empirisme dont il fait partie, ne représente qu'une période transitoire de l'évolution scientifique, il faut la traverser car la Science se trouve au-delà. »

Notre opinion sera un peu plus nuancée : sans aller jusqu'à dire, comme Claude Bernard, que la statistique en tant que science « n'est rien », nous nous garderons de tomber dans le travers de ceux qui, au contraire, penseraient volontiers que la statistique « est tout ».

In medio stat virtus... il est toujours bon de s'en souvenir.

Pour préciser davantage, nous rappellerons d'abord quelques vérités très élémentaires sur la « connaissance statistique » et les résultats qu'elle nous apporte. Il nous sera plus facile ensuite de voir l'intérêt que présente telle ou telle technique particulière.

Souvent, les utilisateurs de méthodes de contrôle nouvelles cherchent dans la statistique un moyen de « prouver » que leur méthode est bonne ou qu'elle est mauvaise. Cette approche est fondamentalement fautive et sans issue.

La statistique ne peut jamais « prouver » quelque chose. Elle nous fournit des probabilités et non des certitudes. Il faut l'interpréter non d'un point de vue strictement mathématique, mais d'un point de vue concret. Elle doit non pas nous servir de preuve, mais de moyen propre à guider notre action raisonnée.

Donnons un exemple qui a directement trait au problème de contrôle qui nous intéresse.

Considérons deux séries de valeurs observées x_1, x_2, \dots, x_n et y_1, y_2, \dots, y_n , relatives la première à un certain phénomène P, la seconde à ce même phénomène perturbé par une action A dont le but est d'accroître les valeurs de la série x.

Peut-on prouver statistiquement que l'action A est efficace ?

C'est impossible. Mais on peut trouver la probabilité pour que la valeur $\bar{y} - \bar{x}$ soit dépassée dans l'hypothèse où l'action A est efficace. Si cette valeur $\bar{y} - \bar{x}$ est très invraisemblable nous admettrons que l'hypothèse d'efficacité est fautive.

Que faut-il entendre ici par « très invraisemblable » ? Il nous semble indispensable, pour l'expliquer, d'utiliser la schématisation de l'urne qui, d'ailleurs, représente bien les phénomènes relatifs aux variables aléatoires.

Nous disons donc, par exemple, que l'écart $\bar{y} - \bar{x}$ est invraisemblable dans le cas où l'hypothèse H_0 est vraie parce que la probabilité qu'il soit dépassé est alors de 1%. C'est pour préciser la nature de cette invraisemblance que notre schéma d'urne est précieux. Ce résultat est identique au suivant : dans une urne contenant 100 boules, 1 boule noire et 99 boules blanches, on a plongé la main une seule fois et on a tiré la boule noire. On admet alors qu'on a eu une chance ou une malchance extraordinaire suivant l'intérêt qui s'attache au tirage.

Supposons maintenant que nous tirions dans la même urne mais dont nous ne connaissons pas la composition. Si nous tirons encore une boule noire, sommes-nous disposés à admettre qu'elle était la seule noire parmi les 100 qui se trouvaient dans l'urne ? Il est vraisemblable que nous refuserons d'admettre cette hypothèse alors que, cependant, elle est peut-être vraie.

Cet exemple fait toucher du doigt les problèmes auxquels se heurte le statisticien, et le genre de réponse qu'il peut leur donner. Il nous montre aussi ce qu'on peut entendre par erreur de première et de seconde espèce, à savoir :

- erreur de 1^{re} espèce : rejeter l'hypothèse H_0 quand elle est vraie,
- erreur de 2^e espèce : accepter l'hypothèse H_0 quand c'est l'hypothèse H_1 qui est vraie.

Ici, d'ailleurs, nous avons présenté une schématisation commode du problème en choisissant intentionnellement des probabilités très petites pour les niveaux de signification. Or, très souvent dans la réalité, et en particulier dans le problème de précipitations qui nous occupe, les probabilités que l'on rencontre ne sont ni très fortes ni très faibles; elles tombent le plus souvent dans la grisaille des valeurs non significatives.

Quelles conclusions pratiques devons-nous alors en tirer ? Comme nous l'avons déjà dit, nous ne pouvons en attendre une preuve au sens formel du mot, mais seulement une présomption — qui sera favorable ou défavorable. Et ce n'est, en fin de compte, qu'en associant au contrôle statistique d'autres techniques de contrôle, c'est-à-dire des techniques qui s'en différencient tant par leur nature que par leur champ d'application, que cette présomption arrivera à se muer, sinon en certitude absolue, du moins en une « certitude pratique » suffisante pour pouvoir juger de l'efficacité de notre action.

Venons-en maintenant aux méthodes elles-mêmes de contrôle statistique. Il n'est peut-être pas nécessaire de revenir sur les principes de base, ni sur le choix de la méthode optimum : on a montré déjà que la comparaison cible-témoin était la plus puissante et la plus satisfaisante. On n'examinera donc que deux questions — les plus importantes d'ailleurs — relatives :

- l'une au groupement des données en vue de leur utilisation,
- l'autre aux tests de contrôle proprement dits, à leur puissance et leurs limitations.

Il est, à ce propos, celui des « limitations », une remarque générale que l'on peut faire ici :

La valeur d'une relation statistique établie pour déterminer d'éventuels changements dus à une certaine opération, dépend non seulement du degré de corrélation des facteurs mis en parallèle, sur la cible et sur le témoin, mais aussi du degré de sécurité avec lequel ces facteurs représentent les caractéristiques véritables de la population ou des deux populations étudiées.

On peut dire, en général, que plus la variabilité de l'une ou de l'autre est importante (il s'agit ici de variabilité naturelle) plus devra être longue la période nécessaire pour pouvoir déceler de façon significative, au sens statistique du terme, un éventuel changement dû à l'opération considérée.

Mais malheureusement, il ne sera pas toujours possible de disposer de séries de « relevés avant opération » qui soient suffisamment étendues dans le temps (et dans l'espace), et peut-être pas toujours possible non plus de poursuivre l'opération pendant toute la durée qui aurait été nécessaire pour obtenir une deuxième série suffisamment longue de données.

Il y a donc là — et tenant à des causes purement matérielles — une « limitation des possibilités » du contrôle statistique des résultats d'une opération.

4.4.2.1. Le groupement des données et leur normalisation

Ce sont les précipitations, observées à l'échelle journalière, qui constituent les seules données utilisables pour le contrôle, des données qu'il faut d'abord regrouper et normaliser avant de pouvoir les soumettre aux tests de la statistique.

Le groupement peut se faire de diverses façons :

— On peut, en premier lieu, en ne considérant les précipitations que dans leur ordre chronologique, les cumuler par périodes de longueurs diverses (mais arbitrairement choisies) telles que le mois, l'année, etc. La plupart du temps, c'est le mois qui est adopté.

Inutile de dire tout ce que peut avoir d'artificielle une telle façon de grouper les données où l'on n'est guidé que par des raisons de commodité complètement étrangères à la vraie nature du problème. Le mois n'est, en fait, qu'une unité de temps administrative ; il n'a, météorologiquement, aucun sens. Le contrôle mensuel ne peut pas en avoir non plus.

— Une autre possibilité, infiniment préférable, est de grouper les précipitations par « épisodes pluvieux » correspondant à des situations météorologiques bien caractérisées ou types de temps. Un épisode pluvieux — on dit parfois : une averse — peut durer un jour, deux jours, et plus rarement, trois jours consécutifs.

Il faudra donc, pour pouvoir ainsi grouper les averses, commencer par classer les situations météorologiques par types de temps.

Le choix des meilleurs critères de classification fait encore parfois l'objet de quelques discussions entre spécialistes. En fait, il ne peut y avoir de classification unique : suivant les buts que l'on poursuit (études climatologiques, par exemple, ou contrôle d'une opération de déclenchement artificiel des précipitations) le ou les critères les plus adéquats seront choisis parmi les multiples facteurs qui caractérisent une situation météorologique.

La classification faite, on pourra alors associer à chacun des types de temps répertoriés, la valeur de l'averse correspondante, ce qui permettra finalement de regrouper ces averses suivant des normes plus « réelles » que le seul ordre chronologique.

D'une façon générale, lorsqu'on effectue un contrôle, de quelque nature qu'il soit, il ne s'agit pas de mettre toutes ses billes dans le même sac. Il faut les trier — et savoir les trier — pour ne comparer entre elles que des choses comparables.

Trier ici des types de temps, c'est l'affaire du météorologiste. C'est dire le rôle primordial qu'il a à jouer dans ce que doit être la première étape de ce contrôle qui n'a, cependant, que le seul qualificatif de : statistique.

La normalisation des données, regroupées suivant l'une ou l'autre des méthodes qui viennent d'être indiquées, constitue la deuxième étape — celle-là purement mathématique — du contrôle.

S'il est toujours possible, lorsqu'on dispose de deux séries de variables associées (telles les précipitations observées simultanément sur la cible et sur le témoin), de calculer la corrélation qui les lie, on ne pourra cependant poursuivre l'analyse du comportement de ces deux séries, par exemple estimer des probabilités, utiliser des tests de signification ou de comparaison, que si les variables obéissent à des lois normales (qui sont tabulées) c'est-à-dire satisfont à certaines conditions.

L'une de ces conditions est l'homoscédasticité des deux variables, ce qui signifie en langage plus simple, que les écarts-types liés doivent être constants. En général, cette condition n'est pas satisfaite pour les pluies naturelles : l'intervalle dans lequel peut varier la précipitation observée sur la cible est d'autant plus étendu que les valeurs

correspondantes observées sur le témoin sont plus élevées. Les distributions peuvent cependant redevenir normales si l'on substitue aux variables naturelles des fonctions convenablement choisies de ces valeurs.

Dans le cas de pluies journalières ou d'averses on a observé que la distribution des précipitations suivait, en général, une loi du type III de Pearson (fonction Γ incomplète). Des tables ou abaques permettent de transformer les précipitations x en variables « normales » t de moyenne 0 et d'écart-type 1.

S'il s'agit de pluies s'étendant sur des périodes plus longues, telles que le mois, on pourra le plus souvent utiliser les racines carrées ou les racines cubiques des précipitations mensuelles qui, elles, ont une distribution sensiblement gaussienne. Si la période unitaire d'observation s'allonge encore (l'année par exemple) il peut arriver que la distribution de la série s'apparente à une loi normale. Mais il sera toujours prudent de le vérifier.

Notons, en passant, que si ce sont des débits de cours d'eau que l'on utilise comme variables — ce qui est parfois possible — ce sont les logarithmes des débits qui se révèlent être les plus gaussiens.

4.4.2.2. Les tests statistiques utilisés

En groupant dans une première série à deux colonnes toutes les valeurs « normalisées » déduites d'observations faites simultanément sur la cible et sur le témoin « avant opération », puis dans une deuxième série toutes les valeurs associées relevées « en cours d'opération » (on dit le plus souvent : les valeurs après opération) on obtient deux populations de valeurs.

Le problème consiste à voir s'il s'agit de deux échantillons d'une même population — auquel cas les inséminations n'auraient eu aucun effet décelable — ou si les échantillons appartiennent à deux populations différentes — ce qui serait alors un indice que les inséminations ont pu modifier quelque chose.

Suivant les méthodes classiques du calcul statistique, on pourra — ayant calculé les coefficients angulaires a_1 et a_2 des deux droites de régression avant et après opération — estimer si l'écart entre ces deux coefficients angulaires est significatif, ce qui peut être fait par l'estimation de la variance de la différence : $a_2 - a_1$.

Sans insister davantage sur ce qui est du domaine de la statistique pure (et que l'on peut trouver dans les ouvrages spécialisés), on dira seulement qu'ayant calculé cette variance σ^2 et en désignant ensuite par t le rapport de $a_2 - a_1$ à la variance σ^2 , on devra, pour juger de la signification de t , se rapporter aux tables de Student-Fisher. Suivant que t sera significatif ou non, on pourra conclure que l'opération aura été un succès ou un échec... avec, naturellement, les réserves qui ont été précédemment faites, à savoir que cette « conclusion » n'est, en fait, qu'une « présomption » qui aura besoin d'être confirmée par tous les autres moyens de contrôle qu'il sera possible d'utiliser.

4.4.3. Les « autres » méthodes de contrôle

4.4.3.1. L'analyse géographique.

Pour caractériser, sur l'ensemble d'une région, la pluviosité d'un mois ou d'une année déterminée, les services météorologiques nationaux utilisent couramment des « cartes d'égal rapport à la normale » (ces cartes s'obtiennent en exprimant d'abord les précipitations mensuelles ou annuelles de chaque station en pourcentage de la moyenne pour la période correspondante, puis en joignant entre elles — par des lignes « isanomales » — les stations d'égal pourcentage). Lorsque le pays dont on veut représenter la pluviosité est plat, le tracé des isohyètes ou lignes d'égal précipitation peut, à la rigueur, suffire. En pays à relief accidenté, il faut avoir recours à la méthode des isanomales qui, éliminant les effets de l'exposition des pluviomètres et l'influence du relief, permet seule de représenter les caractéristiques véritables de la distribution spatiale de la pluie.

Cette méthode détermine, de plus, la position des lignes de séparation entre climats, même si elles se trouvent déplacées sur des versants sous le vent. Elle permettra donc aussi de déterminer la position des « signes de changement artificiel » des climats avec autant d'exactitude que lorsqu'il s'agit de lignes dépendant seulement de facteurs naturels.

Ces diverses raisons expliquent l'intérêt et l'utilité des cartes d'égal rapport à la normale pour le contrôle des opérations de déclenchement artificiel des précipitations.

Les mathématiciens semblent cependant n'accorder que peu de crédit à cette méthode d'analyse graphique. Habités à ne raisonner que sur des chiffres et des formules, ils sont sans doute peu enclins à apprécier des résultats présentés sous une autre forme. En fait, il ne s'agit pas d'un « autre mode » de représentation, mais d'une représentation qui apporte « autre chose ». Méthodes statistiques et méthodes géographiques doivent donc bien être associées, chacune apportant sa part d'information dans le domaine qui lui est propre.

La méthode des isanomales peut d'ailleurs être grandement améliorée, et dans un sens qui ne peut que plaire aux mathématiciens.

La moyenne arithmétique d'une série d'observations n'a, en effet, de signification réelle que si elle est accom-

pagnée d'un indice de dispersion : la seule considération des rapports à la moyenne ne peut donc suffire à juger de l'efficacité des inséminations. A la carte d'is anomalies on préférera une carte des « courbes d'égalité de probabilité ».

Si H est la précipitation enregistrée au cours d'une période déterminée (ici, la période d'inséminations), H_1, H_2, \dots, H_n la série des valeurs correspondantes avant l'opération, M et σ la moyenne et l'écart-type de cette série, l'écart réduit λ est défini par le rapport $H - M$ à σ . A chaque valeur de λ (donc à chaque station) correspond une probabilité P , d'où la possibilité de dessiner une carte des lignes d'égalité de probabilité.

Ainsi, du fait de la très forte variabilité des pluies naturelles, on ne saurait, pour juger de l'efficacité réelle des inséminations, se contenter du seul critère basé sur une comparaison de pourcentages. Mais une quantité de pluie observée peut être un événement rare dans une station alors qu'ailleurs ce sera un phénomène plus banal. Si l'événement rare s'est justement produit sur la cible visée, il devient alors raisonnable de penser que l'intervention faite sur les nuages a pu être la cause ou une des causes de l'anomalie constatée.

4.4.3.2. L'analyse hydrométrique

Si l'évaluation des résultats d'une campagne d'inséminations se fait normalement sur la base des précipitations, ce qui compte surtout pour l'hydroélectricien c'est l'eau qui coule, et qu'il pourra turbiner ou emmagasiner dans un réservoir. Il est donc intéressant pour lui de procéder aussi — lorsque c'est possible — à un contrôle direct des débits.

Ce genre de contrôle ne peut, bien entendu, se faire à l'échelle de l'épisode pluvieux, ni même à l'échelle mensuelle, et ceci en raison des « écoulements différés » qui ne suivent pas immédiatement les précipitations (réserves souterraines qui se reconstituent, report des eaux de fusion du stock neigeux, etc.). L'échelle de temps sera ici l'année, et plus spécialement l'année hydrologique qui est telle, rappelons-le, que les conditions aux limites se retrouvent sensiblement les mêmes d'une année à l'autre. L'opération de pluie provoquée doit donc ici être menée pendant au moins une année hydrologique complète, et de préférence, plusieurs.

Le principe du contrôle reste toujours le même : la comparaison des débits enregistrés en une station collectant les eaux du bassin cible avec ceux d'une station de référence d'un bassin témoin non influencé par les inséminations, mais ayant des caractéristiques géographiques et climatiques analogues à celles du bassin cible.

A la différence de la méthode « statistique » où l'on avait deux populations de valeurs à comparer entre elles, on ne dispose ici que d'une seule population : la série des débits annuels enregistrés avant opération, la seconde se limitant à un seul couple de valeurs ou deux, et rarement davantage, qui sont les débits annuels (un seul chiffre) enregistrés au cours de l'année ou des deux ou trois années d'opérations continues.

Le contrôle ne pourra alors se faire que « coup par coup » : ayant calculé la corrélation avant opération, on placera sur la graphique correspondant le point figuratif de l'opération et on en déterminera les caractéristiques. L'analyse se borne à une constatation exprimée sous la forme suivante : le point figuratif venant se placer à n écarts liés au-dessus et au-dessous de la droite de régression a donc, d'après les tables, une probabilité d'apparition en conditions naturelles de $p\%$.

D'où la conclusion : résultat « bon », c'est-à-dire opération réussie, si p est inférieur à un certain seuil de signification fixé a priori (par exemple 1% correspondant à $2,33$ écarts-types). Et si p est supérieur à ce seuil : résultat « non-significatif » — mais qualifié tout de même d'« encourageant » lorsque le point figuratif de l'opération vient se placer au-dessus de la droite de régression.

Basée, comme on le voit, sur la considération d'une valeur unique (« le » débit annuel en cours d'opération) la méthode de contrôle hydrométrique ne peut être celle qui permettra de « prouver » que les inséminations font quelque chose. Mais elle peut dire « combien » elles en ont fait. Elle est donc, plus qu'un contrôle proprement dit, une évaluation de résultats — qui, d'ailleurs, n'ont plus besoin d'être statistiquement significatifs pour permettre d'établir le bilan économique de l'opération et juger si elle a été rentable ou non.

4.4.3.3. Le contrôle « indirect »

Ce que recherche avant tout un fabricant de pluie artificielle, c'est augmenter au maximum les précipitations sur la cible qui lui a été proposée. Pour le statisticien qui contrôle les résultats d'une telle opération, le critère d'efficacité sera donc un « critère d'augmentation ».

Mais ce n'est envisager là qu'un seul aspect de la question, car un autre critère peut être parfois d'une importance au moins égale : c'est le « critère de répartition ».

Une opération peut n'avoir donné quantitativement qu'une précipitation ne dépassant pas les limites de la variabilité de la pluie naturelle, c'est-à-dire une augmentation statistiquement non-significative. Elle sera cependant réussie si à la distribution des jours de pluie — qui est de nature aléatoire — on a pu imprimer une certaine organisation, ou encore si l'on a pu modifier — dans le sens voulu — le régime pluviométrique naturel.

Il est un fait bien connu des exploitants agricoles, c'est que la valeur d'une même quantité d'eau au point de

vue cultural est variable suivant l'époque où elle tombe : le coefficient d'utilisation d'une pluie de printemps, par exemple, est, du moins dans nos régions, plus important que celui d'une pluie d'automne.

L'agriculteur qui voudra juger de l'efficacité d'une campagne d'insémination des nuages ne pourra, en général, le faire que par une méthode « indirecte » : ayant, par exemple, fait une statistique du rendement de ses récoltes pendant les années antérieures aux opérations, et cela sur deux zones comparables dont l'une, non influencée, servira de témoin, il pourra évaluer si, à la suite de l'opération, le rendement sur la zone-cible s'est amélioré.

A la vérité, la méthode est peu précise — car on sait, en effet, que, même à moyens de culture équivalents, le rendement d'une récolte peut dépendre de bien d'autres facteurs qu'une quantité brute de pluie reçue — mais elle peut donner parfois des indications utiles.

On peut encore imaginer bien d'autres procédés de contrôle indirect, basés, comme celui que l'on vient de décrire, non pas sur l'analyse des précipitations elles-mêmes et de leurs éventuels accroissements, mais sur l'examen des « effets » que peuvent produire de tels accroissements.

On ne devra pas attendre de ces méthodes une bien grande précision ; mais elles pourront toujours apporter à la connaissance du « problème de la pluie provoquée » une contribution qui, si modeste soit-elle, ne saurait cependant être négligée.

V. CONCLUSIONS SUR LA PLUIE PROVOQUÉE

Il n'y a pas, dans la Science, de découverte fondamentale dont on n'ait cherché à tirer, à plus ou moins brève échéance, quelque avantage économique.

On a pu le constater, une fois de plus, dans « l'affaire de la pluie provoquée » : à peine eut-il été établi scientifiquement que l'insémination de certains nuages pouvait provoquer, dans certaines circonstances, le déclenchement artificiel des précipitations, que bon nombre de rainmakers — avant même d'être assurés que cette réalité physique allait pouvoir servir de base à des applications pratiques intéressantes — se lancèrent hardiment dans ces opérations à grande échelle que les champions de la recherche pure s'obstinent encore à juger prématurées.

Si le succès fut parfois discutable, si les résultats obtenus ne furent pas toujours ce qu'avaient escompté ou promis certains expérimentateurs trop enthousiastes, il n'en reste pas moins que « des possibilités existent ». et que vouloir tenter de modifier le temps ou, plus simplement, de faire pleuvoir, n'est plus tellement aujourd'hui du domaine de l'utopie.

Il est déjà certain que la modification et le contrôle du temps commencent à être reconnus universellement comme des réalités d'une importance capitale. « La nation qui, la première, pourra contrôler le temps sera la puissance dirigeante dans le monde »... c'est ce qu'on a pu entendre dire, il n'y a pas si longtemps, à la tribune des Nations-Unies. Et comme pour confirmer qu'il ne s'agissait pas là de science-fiction, mais bien de possibilités réelles de modification du temps, l'Assemblée générale adopta, en sa séance plénière du 10 décembre 1976, le texte d'une convention « sur l'interdiction d'utiliser toute technique ayant pour objet de modifier, par une manipulation délibérée des processus naturels, la dynamique, la composition ou la structure de la Terre, y compris son hydrosphère et son atmosphère » si l'utilisation en est faite à des fins militaires.

Sans aller jusqu'à la guerre météorologique — qui est donc officiellement reconnue comme étant « possible » — on ne saurait nier l'importance que peut avoir pour l'agriculture, l'industrie ou l'économie d'un pays, en général, la possibilité de faire à la demande (ou presque) la pluie et le beau temps. C'est ce qui explique l'intérêt que peuvent manifester certains gouvernements — ceux qui ont pris conscience de leurs responsabilités en la matière — pour les techniques de la pluie provoquée, leur valeur réelle et la confiance qu'il convient de leur accorder.

C'est ainsi qu'aux États-Unis, en 1953, le Sénat américain « pour se faire une opinion motivée sur les procédés de déclenchement artificiel des précipitations » décida de créer un comité consultatif, l'A.C.W.C. — Advisory Committee on Weather Control — organisme gouvernemental dont le rôle fut ainsi défini par le sénateur Case, promoteur du projet :

« Si le comité consultatif trouve que les expériences de modification du temps ne peuvent pas produire d'importants résultats, il en rapportera et ainsi empêchera les fermiers et autres utilisateurs de l'eau, de dépenser leur argent à mauvais escient. Ceci pourra, si un tel rapport doit être fait, économiser des milliers de dollars au public.

« Si le comité consultatif trouve que les activités de modification du temps n'agissent que dans certaines circonstances, il cherchera quelles sont ces circonstances et ainsi encouragera les projets réalisables et découragera ceux qui ne le sont pas.

« Si le comité consultatif établit qu'il peut confirmer les résultats annoncés par les rapports d'expérimentateurs

réputés et scientifiquement compétents — accroissements annoncés de 7 à 40% et plus — alors les bénéfices en dollars de l'agriculture, de l'industrie et du gouvernement seront si grands, qu'ils en deviendront incalculables.»

Le comité, composé de 5 membres « d'aptitudes particulières dans les domaines de la science, de l'agriculture et de l'industrie », de 6 représentants des départements ministériels intéressés, et d'un groupe de travail d'une quinzaine de techniciens, la plupart météorologistes et statisticiens, reçut donc pour mission d'« entreprendre toutes recherches relatives au problème de la modification du temps, et, d'une façon toute particulière, procéder à une évaluation scientifique et objective des résultats des expériences de déclenchement artificiel des précipitations entreprises par tous organismes officiels ou privés ».

Ayant reçu et étudié plus de 200 rapports techniques, pris part à diverses expériences, contrôlé un très grand nombre d'opérations commerciales, consulté plus de 70 spécialistes dans tous les domaines pouvant être rattachés à la modification du temps, il présenta son rapport final à la Maison Blanche le 31 décembre 1957.

C'est un document d'un très grand intérêt pour le technicien de la pluie provoquée. Il comporte plus de 400 pages que l'on ne peut, évidemment, détailler ici. On se bornera donc aux « conclusions » — qui sont les suivantes :

- 1) Pour les opérations effectuées en régions montagneuses, l'accroissement moyen des précipitations a été de 9 à 17%. Cet accroissement est significatif au seuil de probabilité de 1% avec une puissance du test de 0,85.
- 2) Pour les opérations entreprises en régions de plaines, il n'a pas été possible, par contre, de déceler un accroissement statistiquement significatif. Mais cela ne signifie pas qu'aucun effet n'ait pu être produit.
- 3) Avec les techniques d'insémination habituellement utilisées, il n'y a pas lieu de craindre des accroissements de précipitations pouvant devenir catastrophiques. Il n'apparaît pas non plus que des diminutions de précipitations soient à craindre.
- 4) En définitive, et malgré notre connaissance encore imparfaite des grandes lois de la nature (le rapport date de 1957), les techniques utilisées pour le déclenchement artificiel des précipitations peuvent, sans conteste, offrir de « réelles possibilités ».

Il n'y aurait aujourd'hui que peu de chose à changer aux conclusions de l'Advisory Committee.

Voyons maintenant ce que pense de « la pluie provoquée » — ou, plus exactement, ce que pensait il y a quelque vingt ans, et ce que pense actuellement — un grand organisme international, très officiel et très spécialisé, et où, par conséquent, on peut raisonnablement espérer trouver toute la compétence et l'objectivité requises en la matière : nous voulons dire l'Organisation météorologique mondiale.

En avril 1954, c'est-à-dire huit ans après les premières expériences de Shaefer et les premières précipitations obtenues artificiellement, l'Organisation météorologique mondiale publiait une *Note technique*, un épais document dans lequel, après un examen critique des résultats enregistrés au cours de multiples tentatives de déclenchement artificiel des précipitations, et des conditions nécessaires pour l'insémination des nuages, il était conclu — et ceci est très net, et à peu près textuel : « que toutes les tentatives entreprises à ce jour n'avaient conduit qu'à des résultats « contestables » et que tous les moyens employés n'avaient « aucune valeur » pour accroître les précipitations dans les régions où, en général, il ne pleut pas suffisamment, ou pour les provoquer en période de sécheresse, dans les régions où la pluie tombe habituellement en quantité suffisante ».

C'était net et catégorique. Mais c'était aussi, il faut le rappeler, il y a plus de vingt ans.

Aujourd'hui le ton a bien changé.

Dans un document daté de 1969 — la *Note technique* n° 105 faisant le point de nos connaissances en matière de pluie provoquée, et notamment en matière de contrôle pour formuler un jugement sur l'efficacité des techniques utilisées pour accroître les précipitations — l'Organisation météorologique mondiale, après avoir pris soin de souligner que la modification du temps n'en est encore qu'au stade de la recherche, n'hésite tout de même plus à déclarer que : « ... parmi les très nombreuses opérations effectuées dans la nature, certaines ont « clairement démontré » que l'insémination des nuages avait augmenté les précipitations » et encore, que : « ... ces résultats ont été obtenus aussi bien sur des précipitations d'hiver de type orographique, que sur des pluies de cumulus convectifs dans des régions subtropicales », ce qui signifie, pour dire les choses plus familièrement, que même aux yeux de la très officielle Organisation météorologique mondiale, « la pluie artificielle... ça marche ».

Dans un style plus académique, Jean Rostand parlant un jour, et d'une façon très générale, de toutes « ces idées neuves ou innovations technologiques qui eurent, si souvent, tant de mal à s'imposer », avait dit à peu près ceci : « Après la méfiance vient l'enthousiasme. Lorsque les faits ont parlé, l'étonnement fait vite place à l'habitude. Ainsi en va-t-il souvent en science et aussi en d'autres domaines de la pensée : on passe peu à peu de l'incrédulité à l'accoutumance, et l'on finit par regarder comme simple banalité ce à quoi, hier encore, on chicanait le nom de vérité. »

L'évolution des jugements de l'O.M.M. sur la valeur et l'intérêt des techniques de la pluie provoquée vient de nous en donner une parfaite illustration.

Que peut-on, finalement, retenir de tout cela ?

1) Le temps exerce — et exercera toujours — sur la presque totalité des activités humaines une influence indiscutable. Il est, en fait, dans la science, peu de domaines qui aient, pour l'humanité, des implications aussi profondes que les études de l'atmosphère et des phénomènes dont elle est le siège. Il n'est donc pas étonnant que le développement des techniques de la pluie provoquée, ou plus généralement de la prévision et de la modification du temps, ait pu, surtout depuis ces dernières décades, susciter un tel intérêt.

2) « Contrôler le temps » implique, naturellement, que nos connaissances des processus atmosphériques aient atteint un degré tel qu'elles nous donnent la possibilité, par l'application de techniques appropriées, de déclencher les réactions susceptibles de modeler « à la demande » le temps et les climats à l'échelle de continents entiers.

Mais nous n'en sommes pas encore là ; et bien des études restent à faire et des progrès à accomplir avant que l'on parvienne à « connaître » vraiment ce milieu si complexe qu'est l'atmosphère, à comprendre ce qui s'y passe pour être, finalement, en mesure d'y exercer les actions qui seront les plus efficaces.

La maîtrise totale du temps reste, pour le moment, hors de notre portée ; l'ère de la pluie et du soleil à volonté n'est encore pas pour aujourd'hui.

3) Il n'a cependant pas été indispensable de connaître à fond les mécanismes physiques qui sont à l'origine de la pluie naturelle pour pouvoir, dans des conditions, il est vrai, chaque fois bien déterminées, provoquer, à coup sûr, des précipitations.

Des techniques opératoires ont été mises au point ; et des résultats substantiels — et indiscutables — ont été obtenus.

Il est donc permis de dire maintenant — et sans craindre le démenti de quelque contestataire attardé — que la pluie artificielle est devenue « une réalité ».

Une réalité : oui, mais... avec certaines restrictions.

Autrement dit, si l'on sait qu'il est aujourd'hui possible de « faire pleuvoir », il faut savoir aussi qu'on ne peut pas le faire n'importe où, n'importe quand et n'importe comment.

a) Une opération de déclenchement artificiel des précipitations ne se fait, en général, pas sans raisons. Elle peut être entreprise :

— soit dans un but expérimental, pour se rendre compte, par exemple, des possibilités de méthodes nouvelles d'insémination, ou pour rechercher les moyens d'améliorer les méthodes en usage ;

— soit dans un but utilitaire, avec l'espoir d'obtenir un « rendement » économiquement appréciable.

Par application des théories des fonctions de décisions statistiques, il sera loisible de choisir la décision : opérer ou ne pas opérer qui donne la plus grande espérance de gain (gain d'information dans le cas de l'opération expérimentale, ou gain de rendement pour une opération utilitaire).

D'autres considérations non chiffrables pourront bien entendu intervenir dans la prise de la décision : raisons psychologiques, raisons politiques ou diplomatiques, ou toute autre raison d'opportunité.

Une fois prise la décision d'opérer, il reste à voir si l'opération elle-même est effectivement réalisable.

b) C'est ici qu'interviennent « les conditions du milieu ».

Pour qu'une opération de déclenchement artificiel des précipitations ait quelque chance de succès, il est nécessaire qu'il existe au préalable, quelques formations nuageuses répondant d'ailleurs à certaines conditions physiques, c'est-à-dire contenant les éléments essentiels au déclenchement de la précipitation.

En réalité, on ne « fait » pas de la pluie artificielle ; elle doit déjà exister en puissance dans le nuage. Et l'opération que l'on effectue n'est plus, en fait, que le coup de pouce qui, opportunément donné, peut contribuer au mécanisme de la formation de la pluie, et produire, par là même, un accroissement artificiel de la quantité d'eau qui aurait pu tomber en conditions naturelles.

Il peut y avoir des nuages sans pluie, mais il n'y a pas de pluie sans nuages (de pluie naturelle, s'entend). Nous pouvons maintenant ajouter : ... et sans nuages « convenables » il ne pourra, non plus, y avoir de pluie artificielle.

c) Venons-en finalement aux « opérations » proprement dites.

Nombreux sont aujourd'hui ceux qui, ayant appris que « des possibilités existent » en matière de déclenchement artificiel des précipitations, se croient capables de monter une opération.

A en juger par les apparences, que peut-il, en effet, y avoir de plus simple que de faire brûler un peu de charbon ou de coke imprégné d'iodure d'argent ? Mais encore faut-il savoir — et c'est là l'essentiel — où placer les générateurs, combien en placer, et à quel moment, surtout, les mettre en marche et ensuite les arrêter. Fût-on même météorologiste ou physicien distingué, on ne s'improvise pas « rainmaker ».

La règle est absolue : une opération de déclenchement artificiel des précipitations ne peut — à moins d'un hasard miraculeux — donner de résultats positifs que si elle a été précédée d'une préparation extrêmement poussée :

- préparation *avant* toute intervention sur le terrain, pour voir où et quand il peut être possible d'opérer, et décider de la méthode et des moyens à mettre en œuvre ;
- préparation *pendant* le déroulement effectif de l'opération, pour détecter, par l'analyse météorologique des types de temps, les situations favorables aux inséminations, et prévoir le timing du déclenchement des émissions ;
- préparation *enfin*, par la mise en place d'un réseau d'observations adéquat, et par le choix des méthodes les mieux appropriées pour permettre, pendant et *après* l'opération, un contrôle objectif, et inattaquable, des résultats.

Préparer, puis conduire une opération est un travail de « spécialiste » qu'on ne peut, sous peine d'échec, laisser faire par n'importe qui.

d) Quant au contrôle, c'est, généralement, au statisticien qu'on le confie. Ce n'est pas toujours ce que l'on fait de mieux.

Comme l'avait fort bien remarqué Étienne Halphen, il y a quelques années déjà : « Un statisticien qui ignore tout de la météorologie pourra bien appliquer à cette météorologie toutes les méthodes de tests possibles. Mais il n'est pas très raisonnable de recourir à un tel statisticien. Ou alors il faut qu'il commence par apprendre le b, a, ba de la météorologie. »

On pourra dire encore — et c'est exactement la même idée :

Les méthodes statistiques ne peuvent permettre l'évaluation correcte des résultats d'une opération de modification du temps que si le statisticien qui les utilise se double d'un excellent météorologiste.

Une dernière remarque, à ce propos : elle est extraite d'une note relativement récente de l'OMM : « Dans le cas de la stimulation de la pluie, il apparaît que les méthodes statistiques les plus raffinées ne suffisent pas pour remplacer une meilleure connaissance des mécanismes atmosphériques. Elles demeurent cependant nécessaires pour l'évaluation des résultats de nos expérimentations, et la contribution qu'elles peuvent apporter, par le contrôle même de ces résultats, à une connaissance meilleure de cette atmosphère sur laquelle nous voulons exercer notre action. »

Le temps n'est plus un accident, le produit du hasard ou un reflet du caprice des dieux.

Des lois se dégagent, des techniques s'édifient qui permettront à l'homme, un jour proche, de prévoir le temps, d'en régulariser les excès, d'en modifier progressivement le cours.

Les perspectives sont immenses, mais beaucoup de progrès restent encore à réaliser avant d'y parvenir.

En matière de pluie provoquée — l'une des phases les plus communes, sinon les plus spectaculaires des opérations de modification du temps — des résultats positifs, et indiscutables, ont été obtenus.

« Faire pleuvoir » — un des plus vieux rêves de l'humanité — est désormais à notre portée. Des possibilités réelles existent. Le tout est de *savoir les exploiter*.