



Prévention de la grêle par générateurs d'iodure d'argent basés au sol: Résultats de programmes historiques et actuels.



Anelfa

**52 RUE ALFRED DUMERIL
31400 TOULOUSE**

Téléphone : 05 61 52 05 65
Télécopie : 05 62 26 71 24
Courriel : anelfa@anelfa.asso.fr
Site web : www.anelfa.asso.fr



Prévention de la grêle par générateurs d'iodure d'argent basés au sol: Résultats de programmes historiques et actuels.

Résumé	p.1
1. Introduction	p.2
2. Suivi des noyaux d'iodure d'argent des générateurs au sol à la base des nuages	p.3
2.1. Production des noyaux d'Agl	p.3
2.2. Dispersion des noyaux d'Agl et mesures dans l'atmosphère	p.4
2.3. Ingestion des noyaux d'Agl par les nuages et effets physiques	p.6
3. Modèles conceptuels et simulations numériques de l'ensemencement des orages à grêle	p.6
4. Principaux programmes historiques	p.9
4.1. Grossversuch III, Suisse, 1957–1963	p.9
4.2. Mendoza, Argentine, 1959–1964	p.9
4.3. Grandes plaines du Nord, Etats-Unis, 1966–1969	p.10
5. Les programmes actuels de recherche et d'application en France et en Espagne	p.10
5.1. Les réseaux en France	p.10
5.2. Le réseau en Catalogne	p.13
5.2.1. Généralités	p.13
5.2.2. Méthodologie	p.14
5.2.3. Résultats	p.15
6. Résumé et conclusions	p.16
Remerciements	p.18
Références	p.18

Prévention de la grêle par générateurs d'iodure d'argent basés au sol: Résultats de programmes historiques et actuels.*

J. Dessens^a, J.L. Sánchez^b, C. Berthet^a, L. Hermida^b, A. Merino^b

^a ANELFA, 52 rue Alfred Duménil, 31400 Toulouse, France

^b Atmospheric Physics Group, IMA, University of León, 24071 León, Spain

Résumé

La science de la suppression de la grêle par ensemencement des nuages en iodure d'argent (AgI) a été développée en laboratoire durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, et testée dans divers programmes de recherche ou opérationnels avec trois méthodes de diffusion des particules glaçogènes: générateurs au sol, avions, et fusées. Le processus d'ensemencement par tirage au sort a souvent été considéré comme impératif pour une bonne évaluation, mais il n'a pas donné de résultats indiscutables, essentiellement parce que les opérations n'ont jamais duré assez longtemps compte tenu de la nature aléatoire des chutes de grêle violentes, mais probablement aussi à cause de l'utilisation de paramètres impropres à représenter la grêle. Dès cette époque et jusqu'à maintenant (1952-2015), un programme de terrain à la fois de recherche et d'exploitation utilisant un réseau de générateurs au sol s'est poursuivi en France sous l'égide de l'Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques (ANELFA), avec un contrôle basé initialement sur les pourcentages de pertes enregistrés par les assurances grêle, puis sur les mesures par des grêlimètres. Plus récemment (2000-2009) un programme associé d'ensemencement à partir du sol s'est développé dans le nord de l'Espagne, avec un contrôle essentiellement basé sur des données microphysiques et grêlimétriques. Le présent article, qui se concentre sur les programmes français et espagnols en cours, examine la production des noyaux d'AgI, leurs dispersion et mesure dans l'atmosphère, ainsi que leurs effets observés ou simulés dans les nuages. L'article résume les résultats des principaux programmes historiques en Suisse, Argentine et Amérique du Nord, puis se concentre sur les programmes français et espagnols actuels, avec une description de résultats déjà publiés complétée par de nouveaux résultats récemment obtenus en Espagne. La conclusion, du moins pour la France et l'Espagne, est que si l'ensemencement à partir du sol débute trois heures avant la grêle avec un réseau de générateurs de maille 10 km situé dans les zones de développement des orages, chaque générateur brûlant à peu près 9 g d'AgI à l'heure, l'énergie des chutes de grêle des plus violentes journées d'orages est diminuée d'environ 50%.

* Traduction d'un article de synthèse invité paru dans *Atmospheric Research* :

Dessens, J., Berthet, C., Sanchez, J.L., Hermida, L., Merino, A., 2016: Hail prevention by ground-based silver iodide generators: Results of historical and modern field projects. *Atmos. Res.*, **170**, 98-111, doi: [10.1016/j.atmosres.2015.11.008](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.008)

1. Introduction

Dans plusieurs régions du monde, la grêle est l'un des fléaux atmosphériques les plus coûteux aux récoltes, végétaux, automobiles et autres biens. Il arrive que des personnes victimes de dommages par la grêle s'informent auprès de scientifiques sur la possibilité de réduire les dommages par les techniques de modification du temps, et même que parfois elles développent des programmes de prévention sans base scientifique ni contrôle. Cette question s'est récemment exacerbée à l'occasion du réchauffement climatique et du risque d'augmentation de la grêle qui lui est associé. Cette revue a pour but de fournir une information précise sur la prévention de la grêle par ensemencement à partir du sol de noyaux d'iodure d'argent.

Les essais scientifiques pour atténuer ou supprimer les chutes de grêle ont débuté dans les années 1950, quelques années après que Schaefer (1946) et Vonnegut (1947) aient découvert les moyens d'augmenter la concentration en cristaux de glace dans les nuages à l'aide de particules de glace sèche (CO₂ solide) ou d'iodure d'argent (AgI), et en conséquence d'interférer avec les processus naturels de précipitation. Le concept scientifique de la suppression de la grêle était alors qu'en ajoutant des noyaux artificiels de formation de la glace (IFN, en français noyaux glaçogènes) aux noyaux naturels, on induisait une compétition dans le processus de croissance des grêlons qui empêchait le développement de gros morceaux de glace. Les premiers programmes commerciaux et scientifiques ont utilisé des générateurs de fumée d'iodure d'argent, installés sur avion ou au sol, afin d'augmenter la concentration en noyaux glaçogènes dans les nuages convectifs ou dans la couche limite les alimentant (Dessens, 1953 ; Krick, 1954). L'utilisation de fusées pour transporter la substance active à l'intérieur de la cellule orageuse a été développée une dizaine d'années plus tard par les scientifiques russes (Sulakvelidze et coll., 1974).

On peut trouver une revue des premiers programmes de suppression de la grêle dans Changnon (1977) pour les Etats-Unis, Federer (1977) pour l'Europe et l'ancienne URSS, et Dennis (1980) pour le reste du monde. Plus récemment, la Société Américaine des Ingénieurs Civils a publié un manuel sur les programmes de suppression de la grêle (ASCE, 2003) décrivant les perspectives historiques, les bases scientifiques, les méthodes de production de l'agent d'ensemencement, et les processus d'évaluation. Le manuel ASCE rapporte en détail les trois méthodes avec les générateurs au sol, les fusées, et les avions, et il donne une appréciation sur la validité physique de ces méthodes, mais il ne fournit pas d'évaluation quantitative de leur succès. Quelques années plus tard, l'Organisation Météorologique Mondiale a également publié un résumé du manuel ASCE qui ne donne pas

non plus une évaluation des expériences de suppression de la grêle (WMO, 2006). Très récemment, une mise à jour du manuel ASCE a été publiée, toujours sans évaluation (ASCE, 2015).

Comme pour les autres activités de modification du temps, la principale difficulté d'un programme de suppression de la grêle est l'évaluation des résultats. L'ensemencement par avion a donné de fortes indications positives d'efficacité dans le Dakota du Sud (Dennis et al., 1981), le Dakota du Nord (Smith et coll., 1992, 1997), la Grèce (Rudolph et coll., 1994), le Canada et l'Argentine (Krauss 2003). L'ensemencement par fusées a été donné pour très efficace en URSS (Burtsev, 1985 ; Abshaev et Malkarova, 2003 ; Tilsov et Khuchunaev, 2003), et efficace dans d'autres pays (Mesinger et Mesinger, 1992 ; Simeonov, 1996). L'efficacité des ensemencements à partir du sol a également été trouvée significative dans plusieurs pays : France (Dessens et coll., 1970 ; Dessens, 1986b, 1998), Argentine pour les situations de front froid (Iribarne et Grandoso, 1965), et Espagne (Balash et coll., 2004). Cependant, les résultats bénéfiques des trois méthodes ont été discutés de façon critique par d'autres scientifiques parce que deux coûteux programmes avec tirage au sort utilisant soit les avions (Knight et coll., 1979), soit les fusées (Federer et coll., 1986), menés aux Etats-Unis et en Suisse, ont pris fin sans résultats concluants. On a proposé quelques explications à ces différences d'évaluation, parmi lesquelles l'hypothèse que des résultats expérimentaux obtenus sur une cible de petite dimension ne soient pas transposables à des régions plus grandes (Smith et coll., 1992), ou que les résultats dans une région du monde ne soient pas transférables à d'autres conditions ou régimes météorologiques (Atlas, 1977). On considère aussi en général que les deux expériences citées plus haut ont pris fin après trop peu de saisons à grêle pour aboutir à des conclusions significatives simplement parce que les orages les plus violents, qui constituent en réalité le cœur du problème, ne surviennent que très rarement dans une région donnée (Berthet et coll., 2013).

Le but de notre article n'est pas de reprendre le pertinent document ASCE, mais d'examiner les résultats scientifiques et pratiques de la méthode utilisant les générateurs au sol d'iodure d'argent. Le concept de l'ensemencement des orages à partir des générateurs au sol est présenté au Chapitre 2, qui revient sur la production des noyaux d'iodure d'argent par combustion d'un composé d'iodure d'argent, la dispersion des noyaux dans la couche limite, le risque de décroissance du pouvoir glaçogène de l'iodure d'argent sous l'effet des radiations solaires, et l'ingestion des particules par les nuages convectifs. Les changements induits dans les processus microphysiques par les noyaux artificiels sont examinés au Chapitre 3, avec un examen des concepts modernes de suppression de la grêle et des simulations

numériques. Les principaux programmes historiques de suppression de la grêle par générateurs au sol sont résumés au Chapitre 4. Le Chapitre 5 présente le programme scientifique en cours d'opération en France et en Espagne, avec une évaluation des résultats physiques. Finalement, le Chapitre 6 résume les résultats pratiques de la suppression de grêle par générateurs au sol, et suggère quelques améliorations pour le futur.

2. Suivi des noyaux d'iodure d'argent des générateurs au sol à la base des nuages

La possibilité de diminuer l'intensité des chutes de grêle en employant de petits brûleurs au sol mérite d'être soigneusement expliquée aux populations, si ce n'est même à des météorologistes. Le but de ce chapitre est de résumer les résultats scientifiques concernant le cheminement des noyaux glaçogènes artificiels du sol à la base des nuages, et d'estimer leur pouvoir de modifier les processus microphysiques à l'intérieur des nuages. De nombreux articles relatifs à ce chapitre ont été publiés dans le *Journal of Weather Modification* (J. Wea. Modif.), et dans le *Bulletin de l'Observatoire du Puy de Dôme* (Bull. Obs. P.d.D.) ou dans ses successeurs, le *Journal de Recherches Atmosphériques* (J. Rech. Atmos.) et *Atmospheric Research* (Atmos. Res.).

2.1 Production des noyaux d'AgI

Un générateur de noyaux d'iodure d'argent doit produire le maximum de noyaux glaçogènes « efficaces » avec une certaine quantité d'iodure d'argent, « efficaces » signifiant que les particules peuvent donner naissance à des cristaux de glace dans un nuage surfondu à une température donnée. Des expériences ont montré que les plus grosses particules d'AgI sont efficaces à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que les plus petites sont efficaces à plus basses températures. Le rendement d'un générateur brûlant un composé d'iodure d'argent doit être spécifié à différentes températures, mais, pour simplifier, et comme il y a de fortes corrélations entre les nombres de noyaux actifs à différentes températures, on donne souvent le nombre de noyaux actifs à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, une température intermédiaire à laquelle la différence de pression au-dessus de l'eau et de la glace est maximale (Mason, 1971), et l'effet de l'ensemencement probablement le plus important.

Ainsi que l'indique le manuel ASCE (2015), les aérosols d'AgI peut être générés par combustion d'iodure d'argent dans différentes solutions chimiques ou mélanges pyrotechniques. Lorsqu'on brûle une solution acétonique d'AgI-NaI, Dessens (1961) a montré que l'utilisation d'un combustible solide auxiliaire, tel que du charbon de bois, ou d'un combustible gazeux, tel que le kérosène ou le propane, n'est pas

recommandé, les calculs thermodynamiques montrant que les calories de combustion de l'acétone suffisent à vaporiser l'AgI. Sur cette observation, Dessens et Pham van Dinh (1968) ont conçu un générateur utilisant une solution acétonique d'AgI-NaI contenue dans un réservoir sous pression et pulvérisée au bas d'une cheminée dans laquelle la flamme s'organise en vortex (Fig. 1).

Les gouttelettes de solution sont maintenues dans la



Fig. 1. Générateur à vortex à double cheminée utilisé en certains endroits de la côte atlantique française, avec une vue de dessus de la combustion dans une cheminée (les générateurs ordinaires ne possèdent qu'une cheminée).

flamme par l'écoulement en vortex à une température d'environ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui produit la vaporisation complète de l'AgI, mais pas sa décomposition. Dessens (1961) a également démontré que l'efficacité du générateur diminue avec la concentration de la solution en AgI, ce qui a été confirmé expérimentalement par Dessens et Pham Van Dinh (1968). La Fig. 2 donne la production de noyaux actifs à différentes températures pour un générateur à vortex brûlant $1,1\text{ l/h}$ de solution à 8 g/l d'AgI. Chaque point de la courbe a été déterminé par au moins 10 mesures dans une chambre à nuage à mélange après dilution de l'air s'écoulant au-dessus de la cheminée dans un tunnel à vent (Pham van Dinh, 1969). La puissance du générateur à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de $9,6 \times 10^{14}$ noyaux glaçogènes par gramme d'iodure d'argent, ou $8,4 \times 10^{15}$ noyaux par heure, ce qui est comparable à d'autres types de générateurs (Mason, 1971). Les particules sont hygroscopiques, et 50% d'entre elles ont un diamètre moyen d'environ $0,1\text{ }\mu\text{m}$, comme celles produites par d'autres types de générateurs AgI-NaI-acétone (Mossop et Tuck-Lee, 1968). En changeant les conditions de vaporisation de l'AgI, il serait probablement possible de produire plus de particules, mais qui seraient moins actives (Mossop et Jayaweera, 1969). On peut trouver d'autres caractéristiques sur la production et les propriétés des fumées d'iodure d'argent dans Mason (1971) et Dennis (1980).

Lorsqu'on souhaite produire davantage de noyaux glaçogènes en un point au sol, on peut augmenter la

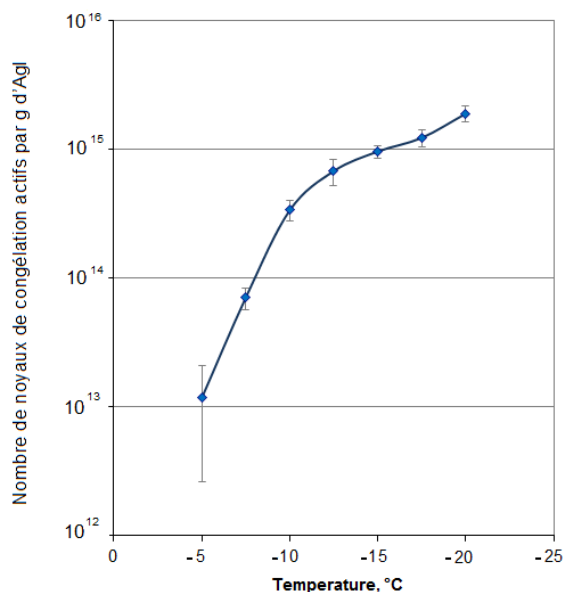


Fig. 2. Nombre de noyaux glaçogènes actifs produit par gramme d'iodure d'argent brûlé dans un générateur à vortex utilisant une solution acétonique à 1% de AgI-0,53 NaI.

puissance du générateur en augmentant la concentration en AgI de la solution, mais le rendement par gramme d'AgI diminue avec la concentration par suite de coalescences entre les particules. Une autre possibilité est d'ajouter un additif à la solution. Plusieurs substances ou oxydants ont été proposés, comme le trichloréthylène, le paradichlorobenzène ou le perchlorate, et le nombre de noyaux produits en laboratoire est effectivement augmenté. Cependant, la plupart de ces substances ont une connotation environnementale négative, et il n'est pas certain que les noyaux modifiés soient plus efficace dans les nuages naturels. Pour ces deux raisons, il est probablement plus sûr d'utiliser un générateur à deux cheminées. De tels générateurs (Fig. 1) sont utilisés en France par l'Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques (ANELFA) en différents endroits le long de l'Océan Atlantique pour la prévention de la grêle, et également en Israël pour l'augmentation des précipitations (Zipori et coll., 2010). Sur le terrain, on peut utiliser des générateurs au sol contrôlés à distance lorsqu'il n'y a pas d'opérateurs disponibles.

2.2. Dispersion des noyaux d'AgI et mesures dans l'atmosphère.

Les particules d'AgI émises au-dessus de la cheminée d'un générateur forment un panache qui, avec la chaleur libérée (environ 7 kW avec la combustion de 1,1 l/h d'acétone), s'élève à environ 10 m au-dessus du sol dans les conditions habituelles. Les particules sont alors transportées et dispersées avec les autres aérosols atmosphériques par les vents horizontaux et verticaux et par la turbulence. Ces processus de diffusion ont été intensivement étudiés en météorologie, et on ne va citer ici que les travaux se

rapportant plus spécifiquement aux générateurs au sol d'iodure d'argent utilisés en situation convective.

Le calcul de la propagation des particules à partir d'un ou plusieurs générateurs au sol a progressé avec la connaissance des lois atmosphériques et l'utilisation de simulations numériques (Serra, 1954 ; Admirat, 1972 ; Bruintjes et coll., 2011 ; Koloskov et coll., 2011). Le résultat global de cette évolution est inclus dans la version la plus récente du modèle Hysplit (Draxler et Rolph, 2015) qui consiste en un système complet de calcul des trajectoires de parcelles d'air et de simulations de dispersion complexe. Le modèle peut être utilisé interactivement sur le web. A titre d'exemple, La Fig. 3 donne les concentrations en AgI, en kg/m^3 , au niveau 950 hPa (environ 400 m au-dessus du sol) dans la nuit du 8 au 9 juin 2014. Les concentrations sont calculées à 01.00 TU après trois heures de fonctionnement d'un réseau de générateurs en fonctionnement. Le modèle de trajectoire prend en compte un diamètre moyen de 0,1 μm pour les particules et les champs atmosphériques du modèle WRF. Un orage à grêle super-cellulaire s'est développé au-dessus de la côte atlantique vers 00 TU puis s'est propagé vers le nord-est au-dessus de réseaux de générateurs. Pendant sa propagation, la cellule est présumée avoir ingéré les concentrations en iodure d'argent calculées par le modèle. Dans les zones jaunes de la Fig. 3, les concentrations en AgI dépassent 10^{-13} kg/m^3 (ou g/l). D'après la Fig. 2, ceci correspond à des concentrations en noyaux glaçogènes d'au moins $10^{-13} \times 10^{15} = 100/\text{l}$. Au chapitre 2.3, on va examiner les effets pouvant résulter de tels apports en noyaux glaçogènes au contenu moyen de l'atmosphère sur les processus de la grêle.

De nombreuses campagnes de mesures ont été consacrées aux processus de diffusion des particules d'AgI émises par les générateurs (Soulage, 1957, 1968). Ces mesures ont été rendues difficiles par la sensibilité des particules d'AgI aux rayons ultra-violets qui peut provoquer une perte de leurs propriétés glaçogènes. Pour cette raison, les processus de diffusion-désactivation ont souvent été étudiés avec des générateurs émettant un aérosol inerte en même temps que les particules d'AgI. Dans une synthèse des recherches conduites dans la période 1950-1975, Pham Van Dinh (1976) a conclu que les processus de désactivation sont fortement dépendants de la composition chimique de la solution d'AgI. Dans les plus récents programmes (Super et coll., 1975), il a été trouvé que le taux de désactivation était très bas et non significatif. Une autre complication dans l'effet des générateurs au sol sur la concentration en noyaux glaçogènes de l'atmosphère est qu'on peut observer des effets retardés ou persistants dans l'ensemencement des nuages avec l'iodure d'argent. Après avoir ensemencé des nuages afin d'augmenter la pluie en Australie, Bigg et Turton (1986, 1988) ont

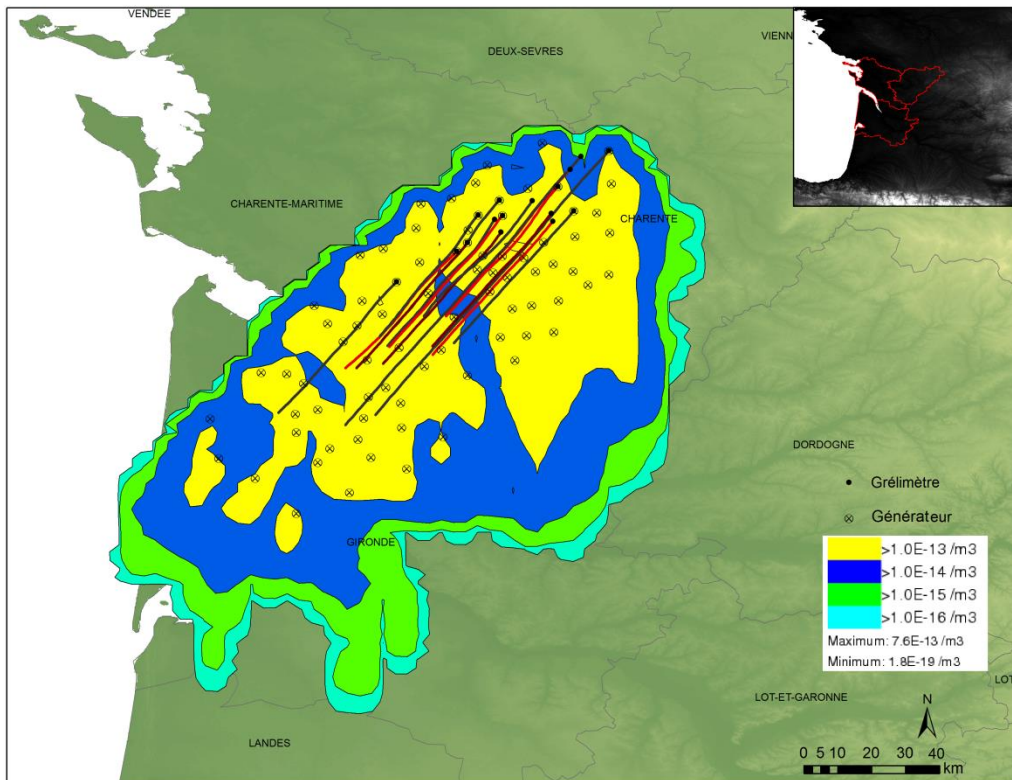


Fig. 3. Concentrations en iodure d'argent, en kg/m^3 , calculées avec le modèle Hysplit (Draxler et Rolph, 2015) au niveau 950 hPa, le 9 juin 2014 à 01.00TU, au-dessus de la région atlantique (vers Bordeaux et Cognac) après 3 heures de fonctionnement des générateurs au sol indiqués par des croix cerclées.

observé une augmentation des précipitations entre 1 et 3 semaines après un jour d'ensemencement, ce qu'ils ont expliqué par une augmentation possible des concentrations en bactéries aériennes glaçogènes dues à de faibles quantités d'iodure d'argent déposées sur la végétation. Les effets de persistance dans les ensemencements à l'iodure d'argent ont été confirmés par Mather et al. (1990) lors d'un programme de suppression de la grêle dans une autre région d'Australie. Une synthèse sur ce sujet a depuis été publiée par Long (2001).

Il n'y a pas de travaux plus récents sur les effets de désactivation ou de persistance des ensemencements à l'iodure d'argent, et on peut conclure qu'il est difficile de déterminer dans une région et à un instant donné le nombre exact de noyaux glaçogènes artificiels ajoutés aux naturels après un ensemencement dans cette région. Cependant, de nombreuses mesures dans l'atmosphère ont montré que l'ensemencement à partir de générateurs au sol augmente le pouvoir glaçogène atmosphérique. Par exemple, dans la province de l'Alberta, Canada, Grandia et Davison (1977) ont mesuré par avion, à l'aide de coupes à différentes hauteurs sous la base des nuages, qu'un réseau d'à peu près un générateur par municipalité (maille d'environ 10 km) conduit à des concentrations moyennes de 2 à 4 fois plus fortes que le bruit de fond naturel. L'étude particulière du 8 août 1975 a montré que l'iodure d'argent émis par les générateurs au sol peut monter dans les régions d'alimentation des cumulonimbus (Heimbach et Stone, 1984). Dans une

autre série de mesures faites dans l'Alberta en 1984 et 1985, Robitaille et coll. (1986) ont trouvé trois journées avec les panaches des générateurs montant jusqu'à la base des nuages, mais ils ont conclu que les interactions entre les panaches, l'alimentation et le courant ascendant du nuage étaient insuffisamment documentées. Dans la province de Vicence, en Italie, Admirat et Buscaglione (1982) ont mesuré par avion que des générateurs au sol mobiles fonctionnant sous des trajectoires d'orages produisent des concentrations en noyaux glaçogènes atteignant jusqu'à 200 noyaux par litre d'air actifs à -10°C dans les courants qui pénètrent la base de l'orage. Ces valeurs représentent une augmentation par 100 à 500 des concentrations naturelles en noyaux glaçogènes. D'autres mesures faites par ces mêmes auteurs dans différentes régions d'Italie ont confirmé la réalité des transferts verticaux par les courants ascendants. Dans les hautes plaines du Montana (Etats-Unis), McPartland et Super (1978) ont vérifié que la diffusion verticale au cours des après-midi d'été suffisait à transporter l'iodure d'argent dans de petits cumulus situés jusqu'à quelques kilomètres de distance des générateurs et à 1,5-2,5 km d'altitude, et que l'AgI est bien absorbé par les orages. Dans une autre région des Etats-Unis, des mesures par avion faites dans le Dakota du Nord à l'aide d'un traceur émis depuis le sol dans des situations convectives ont permis de suivre le sommet du panache du traceur jusqu'à proximité de la base d'un orage en cours de développement (Griffith et coll., 1990).

La modification réelle des processus microphysiques dans les nuages convectifs dépend de la possibilité d'augmenter de manière significative, par l'ensemencement à l'iodure d'argent, la concentration naturelle en noyaux glaçogènes dans la couche limite où se développent les orages à grêle. Dans le sud-ouest de la France, par exemple, le bruit de fond du pouvoir glaçogène est, en moyenne, d'environ 1 noyau par litre actif à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Dessens, 1986a), et un réseau de générateurs peut théoriquement augmenter cette concentration d'un ordre de grandeur après trois heures de fonctionnement (Dessens, 1986b). Les concentrations en noyaux glaçogènes ont été mesurées dans différents pays, et on y a trouvé des bruits de fond similaires, comme par exemple en Australie (Vali, 1985), Etats-Unis (Grant et Schlessener, 1961 ; Vali, 1985), Afrique du Sud (Vali, 1985), Espagne (Castro et coll., 1998), et Chine (Jiang et coll., 2015). Cependant, ces valeurs peuvent changer avec l'évolution des sources et puits spécifiques et avec le changement climatique (Yin et coll., 2011).

2.3. Ingestion des noyaux d'AgI par les nuages et effets physiques

A partir du moment où les noyaux d'AgI ont atteint la base des nuages, leur ingestion par les courants ascendants nuageux n'est plus douteuse, et elle a été étudiée à l'aide de traceurs au cours du « North Dakota Thunderstorm Project » (Boe et coll., 1992). Au cours de ce programme, lors d'une étude de cas de ligne d'orages, cette ingestion a été bien documentée en suivant par radar des paillettes métalliques dispersées par avion juste en dessous de la base des nuages (Reinking et Martner, 1996). Les paillettes ont diffusé dans les cellules nourricières du nuage, et elles en ont rempli le volume.

Par suite de complications diverses dans la mesure des noyaux glaçogènes artificiels à l'intérieur des nuages convectifs, on ne dispose pas de mesures directes au-dessus d'un réseau de générateurs. Cependant, l'effet, sinon la présence, de ces noyaux à l'intérieur des nuages a été observé par photogrammétrie de petits cumulus congestus isolés se développant au pied des Pyrénées en saison estivale : en présence d'un réseau de générateurs au sol en fonctionnement, des glaciations au sommet de ces nuages sont visibles dès que ce sommet atteint le niveau de température $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, au lieu de -35°C (la température de nucléation homogène) dans les conditions naturelles (Dessens et coll., 1968). Une autre observation de l'effet d'un ensemencement a été faite au cours d'un programme avec tirage au sort dans le Dakota du Sud par Dennis et Koscielski (1972). Ces auteurs ont établi que l'altitude des premiers échos radar est abaissée de façon significative dans les nuages ensemencés. Cependant, dans ce cas particulier, l'ensemencement était pratiqué depuis un

avion volant au-dessous de la base des nuages, et non à partir du sol.

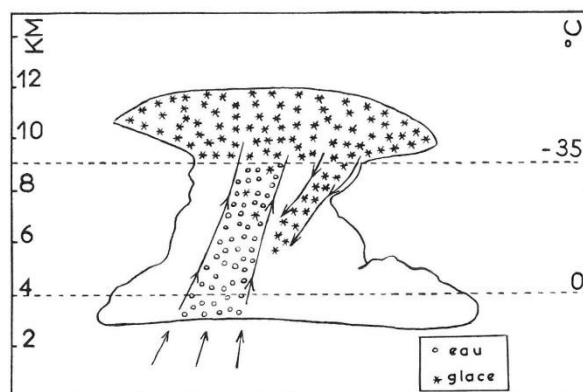
En conclusion du Chapitre 2, un réseau de générateurs d'iodure d'argent au sol, s'il fonctionne assez longtemps pour que les panaches des générateurs se mélangent dans la couche limite atmosphérique avant le développement ou l'arrivée des nuages convectifs, augmente la concentration en cristaux de glace des parties basses de ces nuages, même s'il n'est pas scientifiquement possible de chiffrer exactement le taux d'augmentation qui doit être très variable d'un jour à l'autre et en fonction du type d'orage.

3. Modèles conceptuels et simulations numériques de l'ensemencement des orages à grêle

Le premier modèle conceptuel de prévention de la grêle par ensemencement à l'iodure d'argent formulé dans les années 50 par Dessens (1960a) était fondé sur les deux observations suivantes faites dans le Sud-Ouest de la France :

- 1) La plupart des orages ne produisent pas de chutes de grêle au sol, ou alors ils produisent seulement une chute brève au tout début de leur existence.

(a)



(b)

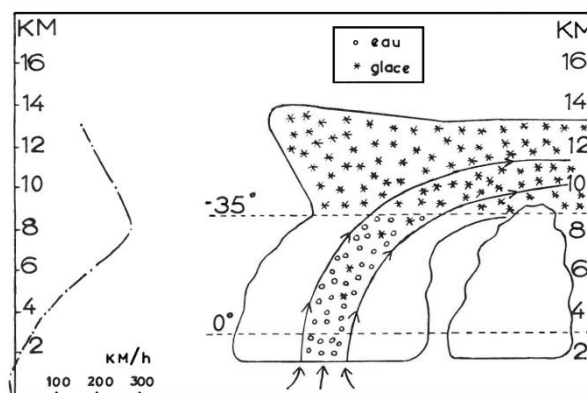


Fig. 4. Schéma d'un cumulonimbus produisant de la grêle au début de son développement, avant que n'opère dans sa partie surfondue l'ensemencement en cristaux de glace (a), et d'un orage à grêle non naturellement ensemencé produisant des chutes de grêle durables (b). Voir Dessens (1960a) pour les détails. Reproduit avec l'autorisation de l'ANELFA.

2) Les chutes de grêle les plus violentes et les plus durables sont celles produites par des orages associés à des vents très forts entre 6 et 12 km d'altitude (Dessens, 1960b).

Ces observations ont conduit aux deux conclusions suivantes :

1. La grêle destructrice est la conséquence du stockage de grandes quantités d'eau surfondue dans le nuage orageux, et du risque de capture de cette eau par un nombre d'éléments glacés assez restreint pour permettre une croissance dangereuse de chacun de ces éléments. Le processus naturel le plus efficace de prévention de la grêle est l'ensemencement massif en cristaux de glace de l'ensemble de la portion surfondue du cumulonimbus par les courants descendants provenant de l'enclume, voir Fig. 4a.

2. Tous les orages sont susceptibles de produire de la grêle sur une petite superficie pendant quelques minutes au début de leur vie ; mais les chutes de grêle étendues et prolongées sont généralement produites par les orages se développant au moment où règnent des vents rapides en altitude, voir Fig. 4b (ces deux paragraphes sont extraits de Dessens, 1960a).

D'après ces observations, Dessens (1960a) a émis l'hypothèse que les noyaux glaçogènes naturels peuvent produire des grêlons, mais qu'ils ne sont pas assez nombreux pour empêcher la grêle. Son idée pour la prévention de la grêle était d'ajouter des noyaux glaçogènes artificiels au moyen d'émissions intenses de noyaux d'iodure d'argent en dessous des nuages. Quelques années plus tard, Soulage (1963) a mesuré dans le Sud-Ouest de la France qu'une augmentation de la concentration en noyaux glaçogènes était suivie

d'une réduction significative des dommages par la grêle. L'organisation des courants ascendants dans un cumulonimbus bien développé est évidemment beaucoup plus complexe que celle indiquée dans la Fig. 4. Par exemple, Yuter et House (1995) ont proposé un modèle conceptuel (et réaliste), basé sur des observations radar et des simulations numériques, d'un ensemble de fontaines de particules dans un cumulonimbus multi-cellulaire (Fig. 5). Ce modèle est adapté aux orages de la Floride, mais il semble aussi convenir à d'autres régions du monde. Il montre la difficulté d'évaluer la concentration en AgI dans les nombreuses parcelles ascendantes, quelque soit le mode d'ensemencement, mais il suggère également qu'un réseau dense de générateurs au sol pourrait être le meilleur moyen d'ensemencer correctement un tel nuage.

Le modèle conceptuel historique élaboré par Dessens (1960a) prend en compte l'interaction globale entre la dynamique et la microphysique des orages, et, dans l'ensemble, ce modèle semble toujours valable. Cependant, dans les années qui ont suivi cette publication, les effets microphysiques ont été considérés plus en détail, en même temps que les processus dynamiques. Dennis (1977) a proposé différents modèles conceptuels de prévention de la grêle relatifs aux trois méthodes, dites d'ensemencement étendu, de traitement des courants ascendants, et d'injection directe. Cette approche a été réexaminée lors d'un meeting d'experts (WMO, 1996), et six concepts principaux relatifs à la modification des orages à grêle par ensemencement des nuages ont été dégagés. Cinq de ces concepts sont illustrés

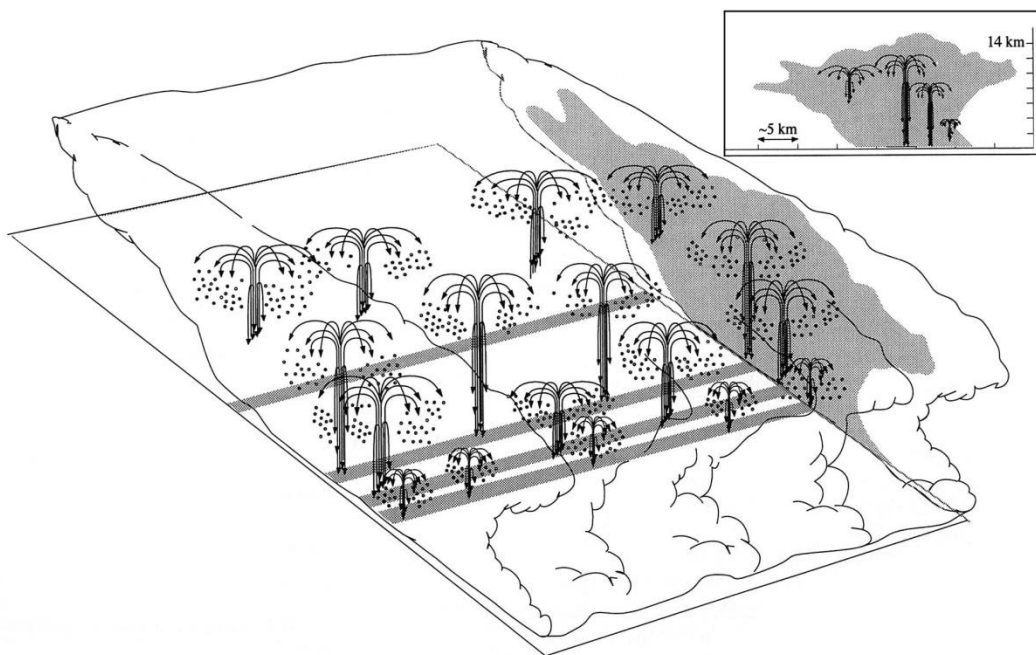


Fig. 5. Modèle conceptuel d'un ensemble de fontaines d'air dans un orage multicellulaire vu en perspective. D'après Yuter et House (1995).

schématiquement par la figure bien connue dessinée à l'origine par Bruce Boe (WMO, 1996). Le premier et principal concept est nommé « compétition bénéfique » : si la concentration en embryons de grêlons est augmentée par l'ensemencement, les grêlons plus petits qui vont en résulter fondront avant d'atteindre le sol. Le second concept, appelé « pluie précoce », réside dans l'accélération des processus de précipitation par l'ensemencement qui produit de petits hydrométéores formés dans des nuages moins vigoureux. Les quatre autres concepts (congélation de l'eau surfondue, abaissement des trajectoires, promotion de la coalescence, ensemencement dynamique) sont toujours sujets à discussion, et nécessitent d'autres simulations numériques avant de pouvoir être définitivement pris en compte (pour plus de détails, voir ASCE, 2015). Le type de concept qui s'applique séparément, ou en liaison avec un ou plusieurs autres concepts, à une situation donnée n'a pas encore été déterminé et dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le système d'ensemencement et le type d'orage. Pour l'ensemencement avec des générateurs au sol brûlant une solution d'iodure d'argent-iodure de sodium bien avant le développement de l'orage, comme on le verra au Chapitre 5, le concept de compétition bénéfique se classe probablement en premier, suivi par celui de la pluie précoce. Les noyaux d'Agl-Nal étant hygroscopiques, le concept placé en troisième position pourrait être celui de la promotion de coalescence.

La seule façon de tester les différents concepts de prévention de la grêle est d'utiliser la simulation numérique. A cette fin, un modèle bidimensionnel de nuage utilisant une formulation de fonction de courant pour décrire les mouvements de l'air dans une section verticale de l'atmosphère a été utilisé dans les années 1970 à l'Institut des Sciences Atmosphériques de l'Ecole des Mines et de la Technologie du Dakota du Sud (Dennis, 1980). Un résultat prometteur de ces premières simulations a été que l'ensemencement produit des précipitations au sol prématurées et des glaciations complètes des nuages (Hwang, 1978), ce qui suggère que le concept de pluie précoce fonctionne réellement. Dans les mêmes années, à l'Institut de Physique Atmosphérique de l'Université de l'Arizona, Young (1977), avec un modèle cinématique à deux dimensions à champ de courant uniforme, a trouvé que le concept d'abaissement de trajectoire semble capable de diminuer de façon significative les concentrations en gros grêlons et la masse totale de grêle. Cet auteur a conclu que l'ensemencement à l'Agl peut être efficace à cet égard, mais que l'ensemencement hygroscopique pourrait être significativement plus efficace en abaissant l'altitude du premier écho radar dans le courant ascendant. Cette remarque suggère que l'utilisation du complexe AgI-Nal est préférable à celle d'Agl pur. Young a également trouvé qu'une concentration en embryons d'ensemencement de

l'ordre de 100 m^{-3} ou davantage est souhaitable pour la suppression de la grêle selon le concept d'abaissement de trajectoire. Cependant, si l'ensemencement ne produit pas des embryons à une concentration aussi élevée, aucun effet délétère n'est attendu, ce qui est rassurant lorsqu'on utilise l'ensemencement étendu et non l'injection directe.

Dans les années 1980, Farley et Orville (1986) et Farley (1987) ont continué avec leurs collègues à développer la modélisation numérique des orages à grêle, de la croissance des grêlons et des effets de l'ensemencement. Leurs modèles de nuage multi-dimensionnels et fonction du temps sont décrits dans Orville et al. (1991). Ils ont étudié plusieurs cas naturels et ensemencés, et on peut trouver dans leurs résultats des effets plus ou moins favorables des ensemencements à l'Agl. Dans leur article le plus récent sur le sujet (Farley et coll., 2004), ces auteurs présentent les résultats d'une simulation numérique de l'ensemencement sur la formation de la grêle dans une série de cellules d'un orage violent du Dakota du Nord, et ils sont conscients que toute spéculation à partir des résultats sur une seule journée à grêle est risquée. Cependant, ils suggèrent que dans une situation de convection explosive avec de nouvelles cellules grossissant rapidement, « le traitement des cellules au tout début de leur développement apparaît crucial pour le succès de la suppression de la grêle. Des augmentations significatives de la pluie sont possibles si les cellules sont naturellement inefficaces ». Les auteurs concluent que « d'autres situations d'orages à grêle devraient être testées afin de vérifier la généralité des résultats, à l'aide de modèles de nuages à 2 et 3 dimensions avec autant de sophistication microphysique que possible ».

De récentes évolutions des modèles de nuage basé sur des schémas microphysiques du deuxième ordre ont été utilisées pour étudier le rôle des noyaux de condensation nuageuse et des noyaux glaçogènes sur les précipitations dans les nuages convectifs et les orages à grêle (Curic et coll., 2007 ; Chen et Xiao, 2010). Ces études confirment que la pollution atmosphérique aussi bien que les ensemencements à l'iodure d'argent peuvent avoir un effet sur la microphysique et la dynamique des nuages convectifs, et elles indiquent que certains paramètres atmosphériques, par exemple la température de la base des nuages, sont cruciaux pour l'impact sur la microphysique des aérosols (Carrió et coll., 2014). Il ne faut pas s'attendre à une réponse simple à la question de savoir comment une augmentation des concentrations en noyaux glaçogènes va changer la pluie et la grêle dans un orage n'importe où dans le monde. Il a même été suggéré, mais jamais confirmé, que l'addition de noyaux glaçogènes dans un courant ascendant riche en eau liquide pourrait augmenter le nombre des grêlons et leur énergie totale, au lieu de déclencher le processus de compétition bénéfique (ASCE 2015). De nombreuses

autres études de cas de simulations numériques sont nécessaires avant qu'une réponse globale puisse être obtenue.

La conclusion de ce chapitre est que l'ensemencement des orages à grêle avec des noyaux d'iodure d'argent diffusés à partir de générateurs au sol dans la couche limite atmosphérique a une base scientifique reposant principalement sur le concept de compétition bénéfique. Comme le montrent les simulations numériques, il existe un niveau élevé de confiance pour que l'ensemencement réduise l'intensité de la grêle au sol, bien que les simulations actuelles ne prennent généralement pas en compte la fusion des grêlons pendant leur chute. Finalement, des expériences de terrain à long terme restent la seule possibilité de tester les concepts de suppression de la grêle dans des conditions environnementales variées. Les deux chapitres qui suivent présentent un examen des résultats de quelques programmes importants passés ou actuels de suppression de la grêle par générateurs au sol en Europe, Amérique du Sud, et Amérique du Nord.

4. Principaux programmes historiques

A côté des programmes français et espagnols toujours en cours qui seront décrit au Chapitre 5, trois programmes historiques de suppression de la grêle avec des générateurs d'iodure d'argent ont été décrits en détail et discutés dans des articles scientifiques.

4.1. *Grossversuch III, Suisse, 1957-1963*

Ce programme a été initié en Suisse par R. Sängler, Professeur à E.T.H. Zürich, et ses résultats définitifs ont été publiés par Schmid (1967). Le Tableau 1 fournit un résumé du programme qui s'est étendu sur 6 saisons à grêle. Le résultat final est basé sur les journées pour lesquelles une chute de grêle s'est produite dans au moins une des 20 stations d'observation. Sur le nombre total des journées du test (147 avec ensemencement, 145 sans ensemencement, selon un tirage au sort), il y a eu 23 journées à grêle sans ensemencement et 38 avec ensemencement. Basé essentiellement sur ces chiffres, il a été conclu que « les opérations d'ensemencement ont été efficaces dans le mauvais sens », bien que la signification statistique des résultats ne soit pas évidente.

Cependant, la conclusion concernant les précipitations a été bien plus convaincante parce que basée sur des mesures physiques. Le nombre de jours de pluie à chaque station a été à peu près le même pour les jours avec et sans ensemencement, mais, selon Schmid (1967), « la quantité moyenne de pluie a été d'environ 20 à 40% plus élevée pour les jours avec ensemencement. Ceci suggère que l'ensemencement n'a pas été efficace en l'absence de pluie, mais qu'il a

fortement augmenté les précipitations les jours de pluie ». Dans ce cas, la signification statistique des résultats semble bien établie.

Un demi-siècle plus tard, il est bien connu que la fréquence et l'intensité de la grêle sont peu corrélées à l'échelle régionale (Berthet et coll., 2011), tout au moins en France, de sorte que dans Grossversuch III il est bien possible que l'ensemencement ait diminué l'intensité de la grêle, même s'il en a augmenté la fréquence. Il eut été intéressant de savoir comment l'ensemencement a changé le produit de la fréquence par l'intensité, qui représente le taux de grêle par station, mais l'intensité n'a jamais été mesurée ni même estimée dans le programme suisse. A notre avis, la conclusion d'une augmentation de la pluie pendant les jours avec ensemencement suggère que les noyaux glaçogènes émis depuis le sol ont été efficaces sur les processus de formation des précipitations, et cette conclusion est intéressante par elle-même. La conclusion de Grossversuch III par l'auteur de son programme était extrêmement négative : « En tout état de cause, il est évident que la méthode appliquée en tant que moyen de prévenir la grêle doit être abandonnée immédiatement » (Schmid, 1967). Malheureusement, cette conclusion a ralenti le développement de la prévention de la grêle par générateurs au sol pendant de nombreuses années, tout au moins en Europe.

Table 1. Résumé du programme suisse de suppression de la grêle « Grossversuch III », 1957-1963.

Concept:	Expérience sous la responsabilité d'une commission fédérale présidée par le Professeur R. Sängler (E.T.H. Zürich)
Emplacement:	Suisse, Canton du Tessin et vallée de la Mesolcina, région montagneuse de 3500 km ² dans les Alpes.
Durée:	7 saisons à grêle
Type d'ensemencement:	Tirage au sort journalier, 23 générateurs au sol « Oerlikon ».
Données d'évaluation:	20 observateurs grêle, 23 pluviomètres.
Résultats:	L'ensemencement augmente le nombre de jours à grêle (« peu de doute »), et la quantité de pluie de 20 à 40% (« évident »).

4.2. *Mendoza, Argentine, 1959-1964*

Le programme argentin, initialement présenté comme expérimental par les scientifiques de l'Université de Buenos Aires chargés de son organisation, avait pour but d'atténuer la fréquence et l'importance des dommages aux vignobles de la région de Mendoza. Un premier rapport après trois ans d'expériences (Grandoso et Iribarne, 1963), puis un rapport final avec deux années d'expérimentation supplémentaires (Iribarne et Grandoso, 1965), contiennent une description détaillée des situations météorologiques à grêle, de l'ensemencement sur tirage au sort avec des

générateurs disposés sur 6 lignes parallèles à la chaîne andine, et des données économiques et analyses statistiques utilisées pour le contrôle. Les générateurs à charbon de bois n'étaient pas très performants, produisant environ 10 fois moins de noyaux glaçogènes que les générateurs modernes.

Table 2. Résumé du programme argentin de suppression de la grêle, 1959-1964.

Concept:	Expérience conduite par l'Université de Buenos Aires.
Emplacement:	Province de Mendoza, 4000 km ² de plaine située juste à l'est des Andes.
Durée:	5 saisons à grêle
Type d'ensemencement:	Tirage au sort journalier, entre 90 et 130 générateurs à charbon de bois tenus par des agriculteurs.
Données d'évaluation:	Domages par la grêle (sur les vignobles) établis par l'Institut d'Assurance Agricole : surfaces atteintes, pourcentages de dommage.
Résultats:	Le dommage moyen diminue de 53 % dans les situations avec front froid, et augmente de 38 % dans les autres situations (faibles niveaux de signification).

Aucun résultat définitif après 5 années d'expérience (Tableau 2) n'a conduit à une conclusion significative au seuil de 0,05, niveau généralement considéré comme acceptable en modification du temps. Le meilleur niveau atteint, soit 0,08; suggère une diminution moyenne de 53% des dommages pour les jours ensemencés en situation de front froid, mais un niveau de 0,11 suggère une augmentation du même paramètre dans les autres situations. Environ un tiers des situations a été classé en front froid. Dans leur rapport final, les auteurs concluent : « D'après les résultats obtenus, on conseille de poursuivre l'expérience en limitant les opérations aux situations avec prévision de passage d'un front froid ». Dans une période plus récente, le Ministère de l'Agriculture de la Province de Mendoza a organisé plusieurs programmes successifs de suppression de la grêle avec des fusées soviétiques, puis des avions, et de nos jours avec avions et générateurs au sol complémentaires installés dans les secteurs montagneux où l'ensemencement par avion est dangereux à pratiquer (de la Torre et coll., 2015).

4.3. Grandes Plaines du Nord, Etats-Unis, 1966-1969

En Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada), plusieurs programmes de suppression de la grêle se sont déroulés dans les années 1950, peu après le succès des expériences d'ensemencement des nuages de 1946-1947 (Borland, 1977). Les résultats de trois des principaux programmes ont été discutés par Schleusener et coll. (1972), mais, en ce qui concerne l'ensemencement à partir du sol, les résultats sont confus parce que les programmes avaient à la fois pour

but d'augmenter la pluie et de diminuer la grêle, qu'ils utilisaient des générateurs au sol et des avions en complément, et enfin qu'un tirage au sort était ou n'était pas réalisé. Pour la grêle, la conclusion principale a été que les orages ensemencés étaient moins intenses et moins nombreux que les orages non ensemencés, bien que le risque de grêle fut à peu près le même pour les deux échantillons d'orages. Une diminution de 70% de l'énergie a été mesurée avec les grêlimètres, avec un seuil de confiance de 0.06 (Schleusener et coll., 1972).

Aucun des résultats résumés ci-dessus n'est complètement concluant, soit parce qu'il n'est pas appuyé par des mesures physiques (aucune mesure avec grêlimètres en Suisse et Argentine), soit parce que l'échantillon de saisons à grêle est trop faible. Cependant, ces résultats suggèrent fortement que les noyaux d'iodure d'argent diffusés à partir de générateurs au sol sont actifs dans les processus de précipitation des orages à grêle, diminuant probablement l'intensité de la grêle dans certaines circonstances (Etats-Unis et Argentine), et augmentant la fréquence de la grêle et la pluie dans d'autres situations (Suisse). On peut observer que l'augmentation de la fréquence de la grêle n'est pas forcément un problème sérieux si elle résulte seulement d'un plus grand nombre de journées à grêle avec de très petits grêlons.

5. Les programmes actuels de recherche et d'application en France et en Espagne

5.1. Les réseaux en France

En 2015, l'ANELFA a effectué sa 64^{ème} saison de recherche et de prévention. Cette expérimentation continue a débuté en 1952 dans le Sud-Ouest de la France par un système d'ensemencement à partir du sol qui a remplacé des activités de prévention disparates et non scientifiques. Le programme a été initié par des scientifiques de l'Observatoire du Puy de Dôme, Université de Clermont-Ferrand, dans le but de tester et d'améliorer la nouvelle méthode. Les recherches et expérimentations des deux premières décades ont permis de dresser l'inventaire des concentrations naturelles en noyaux glaçogènes des régions à protéger, d'améliorer les générateurs d'iodure d'argent, et de déterminer les effets de l'ensemencement à partir du sol sur la physique des nuages. Au début des opérations, seulement quelques générateurs à charbon de bois étaient installés le long des Pyrénées et de la Côte Atlantique sud, mais le réseau s'est progressivement étendu à la région Aquitaine. En 1984, 455 générateurs à vortex assuraient la protection d'une région de 55.000 km², puis, comme la grêle en France ne se limite pas au Sud-Ouest, le réseau de l'ANELFA s'est étendu, année après année, au Sud-Est (Provence) et au centre de la France.

FRANCE

RESEAU DE PREVENTION GRÊLE

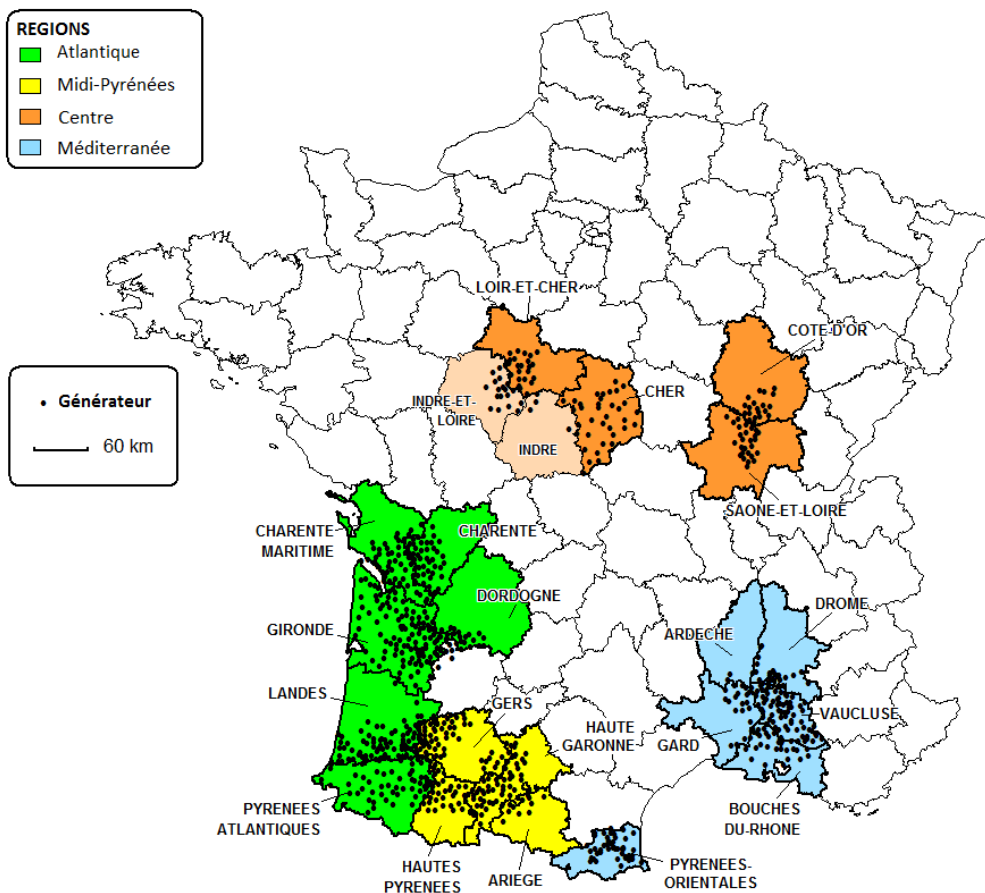


Fig. 6. Carte des réseaux de générateurs de l'ANELFA en 2015.

En 2015, 838 stations d'ensemencement étaient tenues par des opérateurs bénévoles sur une superficie totale d'environ 70.000 km². La plupart des vignobles français font désormais partie du réseau national de l'ANELFA, le dernier ayant rejoint le programme étant la Bourgogne en 2014 (Fig. 6). L'organisation du programme, les réseaux locaux, et les activités journalières d'ensemencement sont présentés sur le site web de l'ANELFA (www.anelfa.asso.fr), et un résumé est donné dans le Tableau 3.

Jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle, le but principal de la prévention de la grêle était de diminuer les dommages aux récoltes, de sorte qu'historiquement le contrôle de l'efficacité des ensemencements consistait à examiner les données des assurances agricoles. De 1944 à 1986, ces données ont été soigneusement établies par le Pool Grêle Concorde, qui était le correspondant français de l'Association Internationale des Assureurs contre la Grêle (Moreau, 1983). Cette organisme publiait les taux annuels de perte à risque des cultures dans la zone traitée par l'ANELFA (zone cible), dans une zone non traitée située sous le vent (zone tampon), et dans le reste de la France (zone contrôle). La courbe double-

masse des taux de perte à risque entre les zones cible et contrôle a montré une rupture de pente de cette courbe en 1965, l'année de l'installation des générateurs à vortex, indiquant une diminution de 41% des dommages dans la zone cible. Un test bi-variable a montré que le changement de pente était significatif au seuil 0,01. Le rapport du bénéfice au coût du programme a été estimé à environ 24 (Dessens, 1986).

Ces résultats ont permis à l'ANELFA de développer son programme d'ensemencement et d'installer des réseaux de grêlimètres pour mesurer les paramètres des chutes de grêle et remplacer les données économiques par des données physiques afin de déterminer avec plus de précision l'efficacité des ensemencements. Les réseaux de grêlimètres se sont d'abord développés dans les régions du Sud-Ouest à partir de 1988, ce qui a permis une évaluation du programme après 8 années de mesure (Dessens, 1998). Cette évaluation était basée sur des corrélations entre le nombre des grêlons de plus de 0,7 cm dans les chutes de grêle au sol et la quantité d'iodure d'argent diffusée dans la zone de développement de l'orage avant la croissance des grêlons. La diminution du nombre des grêlons a été trouvée en relation linéaire

avec le taux d'ensemencement, atteignant 42% pour les cellules les mieux traitées. Le nombre de grêlons de plus de 0,7 cm est considéré comme un bon évaluateur des dommages aux récoltes (Changnon, 1971). A nouveau, le seuil de signification de la diminution était de 0,01.

Tableau 3. Principaux éléments du programme ANELFA.

Organisation du programme :	Association sans but lucratif fédérant 15 associations locales dans 4 régions de France. Chaque association locale est responsable de son propre budget et du fonctionnement. Les opérations sur le terrain se déroulent d'avril à septembre sur une superficie totale de 70.000 km ² (en 2015).
Éléments météorologiques :	Les orages principaux (parfois des super-cellules) sont associés à des flux rapides de sud-ouest en altitude. Les autres situations habituelles sont de front froid, talweg, et marais barométrique.
Environnement des orages :	Niveau de fusion : de 2 à 4 km (du printemps à l'automne). Altitude et température à la base des nuages : de 0,9 km (13°C) à 1,5 km (6°C).
Durée:	64 saisons à grêle.
Système d'ensemencement :	Générateurs au sol, brûlant 1,1 litre par heure d'une solution acétonique à 8 g d'AgI-0,5 NaI par litre, tenus par des opérateurs bénévoles. Les réseaux locaux sont activés 4 heures avant les premières chutes de grêle prévues et jusqu'à la fin de l'épisode.
Prévision de la grêle :	Réalisée à l'échelle d'un réseau local par des organismes professionnels (en 2015 : Météo-France, Keraunos). Transmission automatisée des alertes aux stations d'émission.
Évaluation du programme	Corrélations entre les taux d'AgI émis par les générateurs (838 en 2015) et les énergies cinétiques des chutes de grêle mesurées avec des grêlimètres à plaque de polystyrène (1275 en 2015).

Cette première détermination physique a été améliorée quelques années plus tard en remplaçant le nombre de grêlons par l'énergie cinétique, ce qui est devenu possible avec un plus grand nombre de cas (l'écart type des énergies cinétiques étant plus grand que celui des nombres des grêlons, il faut un plus gros échantillon de données pour arriver à un même seuil de signification). Un raffinement de la méthode décrite au paragraphe précédent confirme l'effet des ensemencements sur les nombres de grêlons pour 18 principales journées à grêle (-40%), et donne une diminution de 50% (significative au seuil de 1%) de l'énergie cinétique. Ce résultat est obtenu lorsqu'environ 10 générateurs par 1000 km², chacun diffusant 9 g d'AgI par heure, sont disposés dans la zone de naissance des cellules à grêle, et quand ils ont diffusé l'iodure d'argent pendant les 3 heures précédant les chutes de grêle (Dessens et coll., 2006).

Quelques années plus tard (Dessens et coll., 2009a), l'évaluation de l'efficacité a été étendue à un

échantillon de 24 principales journées à grêle, et l'effet de l'ensemencement a été examiné dans chaque classe de diamètre de grêlons par la même méthode que celle décrite dans Dessens (1998) qui consiste à comparer les chutes de grêle respectivement plus ou moins ensemencées que les moyennes journalières. La Fig. 7

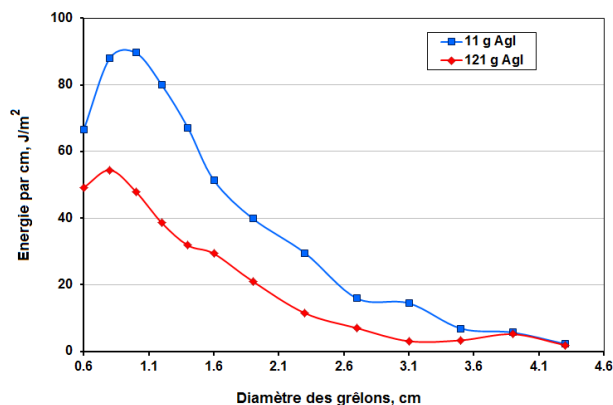


Fig. 7. Distributions des énergies cinétiques des chutes de grêle ensemencées plus ou moins que la moyenne pour 24 principales journées à grêle

donne l'énergie cinétique (par cm de gamme de diamètre) pour ces chutes de grêle, et elle montre que cette énergie est plus faible pour les cas les plus ensemencés dans tous les diamètres, la différence étant maximale dans les classes 1,2-3,5 cm. Le faible effet apparent de l'ensemencement sur les grêlons de plus de 3 cm peut être dû au petit nombre de chutes de grêle dans cette classe. Les chiffres utilisés pour calculer l'efficacité globale sont donnés pour l'ensemble des classes dans le Tableau 4. Le nombre élevé de chutes moins ensemencées que la moyenne est dû à des grêles situées en dehors ou en bordure des zones protégées. Les chutes respectivement plus ou moins ensemencées que la moyenne ont leurs énergies statistiquement différentes au seuil de 0,01. La diminution de l'énergie pour les chutes les plus ensemencées est de 47% en comparaison des chutes les moins ensemencées. Compte tenu d'une efficacité résiduelle probable sur les chutes les moins ensemencées, la diminution moyenne de l'énergie de la grêle atteint 49,5%. Le taux d'ensemencement des cas convenablement traités correspond à 4,7 générateurs fonctionnant pendant les 3 heures avant la grêle dans

Table 4. Taux moyen d'ensemencement et énergie moyenne des cellules ensemencées plus ou moins que la moyenne journalière pour 24 principales journées à grêle.

	Toutes les cellules	Cellules ensemencées moins que la moyenne	Cellules ensemencées plus que la moyenne
Nombres de cellules	561	362	199
Poids AgI, /3h/531 km ²	50,2 g	11,4 g	120,7 g
Énergie moyenne, /m ²	108,0 J	129,6 J	68,7 J

un cercle de 531 km² où se développe la cellule de grêle. La distance entre le milieu de ce cercle et le lieu de la grêle correspond à un temps de parcours de l'orage de 45-66 minutes d'après des simulations numériques ou les corrélations mesurées entre ensemencement et grêle (Dessens et coll., 2009b). Ces conditions opérationnelles, avec une valeur arrondie à 1 générateur tous les 10 km, constitue à présent le standard recommandé sur les réseaux locaux de l'ANELFA. Cette maille de 10 km est supérieure à celle de 8 km recommandée par ASCE (2015), mais, en principe, les générateurs de l'ANELFA sont allumés au moins trois heures avant que les orages ne se développent.

En résumé, les mesures avec les grêlimètres indiquent que l'ensemencement diminue d'environ 50% l'énergie des chutes de grêle lorsqu'un réseau de 1 générateur par 100 km², chacun brûlant 9 g d'Agl à l'heure, fonctionne trois heures en avance au bon endroit. Il existe également des indications préliminaires selon laquelle la fréquence journalière de la grêle (ou la surface grêlée) est réduite par l'ensemencement (ANELFA, 2013). Cependant, si on prend en compte le taux moyen d'ensemencement délivré à toutes les cellules (incluant celles des jours sans alerte grêle, et celles insuffisamment traitées parce que situées en bordure des zones protégées), l'efficacité globale moyenne du programme ANELFA n'atteint pas ce standard dans toutes les situations. Le positionnement des générateurs sur le terrain et la prévision de la grêle à 3 ou 4 heures d'échéance restent les points principaux du programme.

5.2. Le réseau en Catalogne

5.2.1. Généralités

En 1976, les activités de suppression de la grêle ont commencé dans la région des Terres du Ponent, Province de Lérida, qui est située en Catalogne dans la Moyenne Vallée de l'Ebre (MEV). Le but était essentiellement de couvrir une région de 2100 km² de vergers et de cultures irriguées. Les agriculteurs avaient formé une association appelée ADV Terres de Ponent, dont les dépenses pour la suppression de la grêle étaient prises en charge presque exclusivement par ces agriculteurs. L'expérience de l'ANELFA a servi de modèle aux activités d'ensemencement, et des générateurs identiques à ceux utilisés dans le sud de la France ont été fabriqués et utilisés avec le même taux de nucléation. Dans les années 1990, ADV Terres de Ponent a décidé d'automatiser ces générateurs par un système de commande à distance.

En 1997, l'association a participé au projet EURICE, dont l'objectif était de déterminer la quantité d'eau liquide surfondue (SLW) contenue dans les orages de la région MEV. Un petit réseau de grêlimètres (seulement 70) a été installé, et différentes études ont porté sur

l'évaluation de l'efficacité et sur les effets adverses possibles des ensemencements.

Un total de 67 vols a été réalisé avec un C22 équipé d'une instrumentation complète en physique des nuages. Tous les vols se sont déroulés par temps d'orage afin de caractériser les processus de formation de la SLW (García-Ortega et coll., 2006). A l'occasion d'un vol, un orage violent a été suivi dès avant son entrée dans la zone de l'ADV Terres de Ponent jusqu'à ce qu'il atteigne la zone protégée et subséquentement se dissipe. Les résultats des mesures montrent un type inhabituel de nucléation de la glace à partir de la SLW. En fait, avant l'entrée de l'orage dans la zone protégée, la concentration en glace au niveau -10 °C était à peine au-dessus du seuil de détection de l'instrument. Puis il y a eu une augmentation de la SLW, avec des zones atteignant 20ml/kg d'air. Au moment de l'entrée de l'avion dans la zone ensemencée, la SLW est devenue à peu près nulle par suite de sa conversion en cristaux de glace. A 50-60 km au-delà de la zone protégée, les mesures microphysiques ont montré un contenu en eau liquide surfondue (LWC) de 2,5-4 ml/kg, une concentration en grésil de 3 ml/kg, et une concentration en noyaux de glace de 130 ml/kg. Ces résultats suggèrent que 30 minutes ont été nécessaires aux générateurs pour affecter la nucléation de la glace à l'intérieur d'un orage proche.

Les tendances des précipitations estivales dans la péninsule ibérique ont été analysées dans le cadre du programme nommé plus haut (Mosmann et coll., 2003), en particulier dans les régions avec suppression de la grêle par générateurs au sol d'Agl. Aucun effet des ensemencements sur les précipitations estivales n'a été décelé (Sanchez et coll., 1998, 1999). L'eau des précipitations avec et sans ensemencement a été analysée (Sanchez et coll., 1999). Les analyses montrent que les concentrations en Ag sont très inférieures aux normes recommandées. Ainsi, les effets indésirables des substances émises par les réseaux de générateurs d'Agl sont écartés.

Dans l'année 2000, ADV Terres de Ponent a proposé un nouveau plan de 5 ans pendant lequel, en addition au réseau opérationnel des générateurs, un réseau de stations météorologiques a été installé, et le réseau de grêlimètres a été étendu selon le modèle développé par Fraile et coll. (1999). Ce modèle constitue un réseau de 165 grêlimètres placés tous les 5 km et s'étendant un peu au-delà des limites de la zone protégée. Ce plan avait pour objet d'évaluer la suppression de la grêle de la même manière que dans le sud de la France (Dessens, 1998).

En outre, en 2001, le Groupe de Physique Atmosphérique de l'Université de León (Espagne) a installé un radar météorologique dans la région MEV et a développé des applications pour différencier les cellules orageuses avec et sans grêle, pour améliorer les modèles de prévision de grêle, et pour approfondir la compréhension des processus de convection violente

dans cette région (López et coll., 2007 ; López et Sánchez, 2009).

Enfin, en 2005, ADV Terres de Ponent a interrompu les activités de suppression de la grêle mais a maintenu un réseau opérationnel de grêlimètres, ce qui fournit d'excellentes données sur les chutes de grêle et leurs caractéristiques pendant les périodes sans ensemencement. De plus, on peut faire des comparaisons entre périodes avec et sans AgI. Le réseau de grêlimètres est toujours en activité.

5.2.2. Méthodologie

Tous les épisodes d'orages à grêle survenus dans la zone protégée de Lérida entre 2000 et 2009 ont été analysés. En premier lieu, on a examiné les spectres de la grêle enregistrés par le réseau de grêlimètres pour les périodes avec puis sans ensemencement (2000-2004, puis 2005-2009). Il s'agissait de déterminer s'il y a une différence entre les distributions des deux périodes en considérant tous les orages dans la zone d'étude.

Ensuite, chaque évènement de grêle a été analysé plus soigneusement. Avec le radar, on a identifié les cellules d'orages afin de déterminer les zones de croissance, les trajectoires, et l'évolution de chaque

évènement de grêle. Une fois les zones de développement des orages identifiées, on a considéré tous les générateurs de la zone en question. En considérant individuellement les panaches des générateurs, on a alors pu déterminer ceux ayant potentiellement ensemencé les cellules dans leurs zones de croissance (Fig. 8).

Par cette méthode, on a déterminé la quantité d'iode d'argent ayant pu atteindre le nuage et interagir avec la formation des cristaux de glace. Le réseau des grêlimètres a par ailleurs servi à déterminer les caractéristiques de la grêle au sol. Finalement, on a déterminé le nombre d'impacts laissés par chaque orage pendant son passage au-dessus du réseau, ainsi que l'évolution de ce nombre en fonction de l'ensemencement.

De tous les évènements enregistrés, on a éliminé ceux pour lesquels les cellules orageuses n'avaient pas été bien reconnues par le radar, car la détermination des zones de croissance n'aurait pas été possible. On a également rejeté les cas où plusieurs cellules étaient passées au-dessus du même grêlimètre puisqu'il n'était alors pas possible de distinguer les impacts de chaque chute. Enfin on n'a pas considéré les situations pour lesquelles moins de 30 minutes s'étaient écoulées

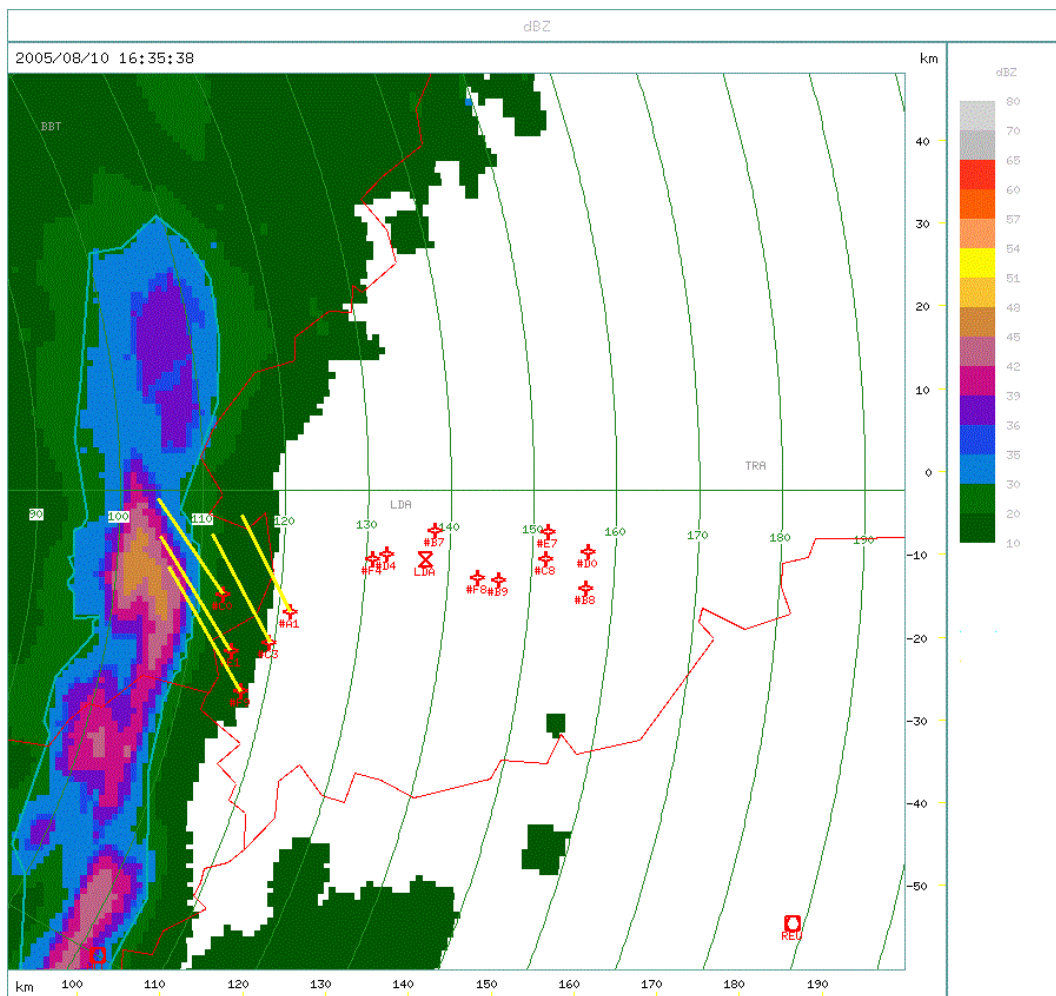


Fig. 8. Exemple d'identification des générateurs ensemencant un orage. L'échelle des couleurs indique la réflectivité radar (en dBZ). Les croix rouges représentent l'emplacement des générateurs d'AgI. Les lignes jaunes sont les axes des panaches des générateurs ayant ensemencé l'orage.

entre le temps où l'orage avait été ensemençé et le moment où le grêlètre avait été impacté. On considère en effet qu'il faut au minimum 30 minutes pour que l'Agl atteigne le nuage et agisse sur la formation des grêlons.

Chaque orage a été associé au nombre de grêlètres impactés, au nombre d'impacts de grêlons par grêlètre, et au taux d'ensemencement (Fig. 9). De cette façon, les variables suivantes ont été définies pour chaque évènement :

- Différentiel du nombre d'impacts, ΔNi : différence entre le nombre d'impacts de chaque grêlètre et le nombre moyen d'impacts pour tous les grêlètres affectés par l'orage.
- Différentiel du taux d'ensemencement, ΔSi : différence entre la quantité d'Agl ayant dû pénétrer dans l'orage juste avant impact sur un grêlètre et la quantité moyenne pour tous les grêlètres impactés par l'orage.

ΔSi représente le supplément d'ensemencement d'une cellule par rapport au reste de l'orage, c'est-à-dire que plus cette valeur est élevée, mieux la cellule a été traitée. ΔNi indique l'importance de la grêle de cette cellule par rapport à celle de l'ensemble de l'orage. On s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle mieux une cellule a été traitée, moins de grêlons impactent le grêlètre, puisque le même nombre de noyaux glaçogènes est ajoutée dans une région à quantité donnée de SLW. On suppose également que le diamètre des grêlons est plus faible avec un meilleur ensemencement, et que les plus petits grêlons fondent avant d'arriver au sol.

Cette méthode a été appliquée sur la période avec activité de suppression de la grêle (2000-2004), puis sur celle sans ensemencement (2005-2009). Sur les deux périodes, on a sélectionné un total de 118 cas entre les mois de mai et septembre, et on a appliqué séparément la même méthode à chacune d'elles avec pour objectif de déterminer des différences de résultats entre les deux périodes.

5.2.3. Résultats

Quand on étudie la distribution dimensionnelle de la grêle dans une région, on doit tenir compte d'une cassure dans cette distribution (Sánchez et coll., 2009). Pour déterminer si la position de cette cassure est modifiée par l'ensemencement en Agl, on utilise une méthode régressive permettant de détecter les cassures.

Le test de Mann-Whitney confirme qu'il y a des différences significatives entre les diamètres des grêlons des deux périodes, et donc que les deux populations ne peuvent pas être considérées simultanément.

Les résultats de la méthode régressive montrent une discontinuité dans la distribution dimensionnelle pour chaque période, avec un changement abrupt dans la distribution des plus gros grêlons. La cassure se situe à 2,4 cm pour la période avec ensemencement (2000-2004), et à 2,8 cm pour la période sans ensemencement (2005-2009). Ce résultat confirme une variation dans la distribution dimensionnelle de la grêle vers de plus gros diamètres en l'absence de traitement.

L'hypothèse selon laquelle le nombre de grêlons frappant un grêlètre est plus faible avec un

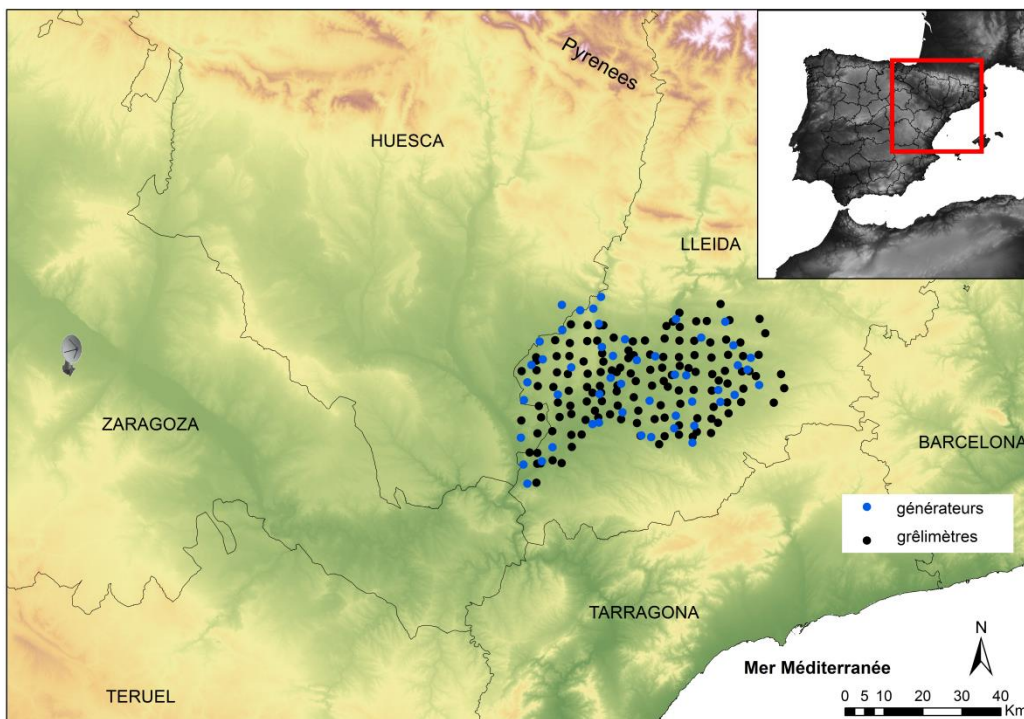


Fig. 9. Zone d'étude. Les points en noir indiquent l'emplacement des grêlètres, et ceux en bleu celui des générateurs.

ensemencement meilleur a ensuite été analysée. La corrélation de Spearman a été appliquée entre les deux variables ΔNi et ΔSi pour les deux périodes (avec et sans ensemencement), parce que la normalité de la distribution des données n'est pas assurée. Pour la période avec ensemencement, on obtient une faible corrélation négative, cependant significative au seuil de 0,01 ; ainsi, un taux d'ensemencement plus élevé conduit à moins d'impacts sur le grêlimateur. Cette relation peut s'expliquer par le fait que pour une même quantité de SLW un nombre plus élevé de cristaux de glace génère davantage de plus petits grêlons. En conséquence, la fusion des grêlons pendant leur chute vers le sol est plus importante, ce qui augmente la probabilité qu'ils n'atteignent pas le grêlimateur. Il est également possible que même si ces grêlons n'ont pas totalement fondu, ils sont trop petits pour laisser une trace de leur impact sur le grêlimateur. On peut donc conclure à l'efficacité de l'ensemencement pendant la période d'activité. Pour la période 2005-2009 sans ensemencement, on relève au contraire une très faible corrélation directe (non significative) entre le taux d'ensemencement (virtuel) et le nombre d'impacts. Il y a finalement un plus grand nombre d'impacts sans ensemencement, parce que de plus gros grêlons ont plus de chance d'être enregistrés sur les grêlimateurs.

Les diagrammes de dispersion entre les deux variables, c'est-à-dire le taux d'augmentation du nombre d'impacts (la variable dépendante) et le taux d'ensemencement (la variable initiale) sont donnés pour les deux périodes sur la Fig. 10. La relation linéaire sur chaque diagramme illustre les corrélations trouvées précédemment. Pour la période avec ensemencement, la corrélation de Pearson est égale à -0,23, ce qui est significatif au seuil 0,05. Pour la période sans ensemencement, cette corrélation est égale à 0,05 et n'est pas significative. On enregistre donc une nette diminution de la grêle due à l'ensemencement pendant la période 2000-2004, alors que cet effet n'est pas observé pendant la période « avec placebo ». Ces

résultats confirment l'efficacité du mode de prévention de la grêle dans la région étudiée.

6. Résumé et conclusions

Les programmes historiques suisse et argentin de suppression de la grêle avec des générateurs au sol d'iodure d'argent appliquaient un tirage au sort pour l'ensemencement ou le non ensemencement, et leurs résultats hétérogènes sont restés non concluants et controversés, surtout parce que les programmes n'ont pas duré un nombre suffisant de saisons à grêle. Pour le moins, et selon Atlas (1977), les résultats ont suggéré « que l'ensemencement à partir du sol peut-être efficace malgré les déclarations de divers chercheurs selon lesquelles une injection directe à la base du nuage est fondamentale pour le succès des opérations ». A l'inverse, les deux programmes toujours en cours en France et en Espagne n'ont jamais utilisé le tirage au sort, et ont pris le temps nécessaire pour aboutir à des résultats à signification élevée : en France, 18 saisons à grêle (1965-1982) avec les données des assurances, puis 27 avec celles des grêlimateurs (1988-2014), et en Espagne 10 saisons avec les données des grêlimateurs (2000-2009). La conclusion générale est que lorsqu'un réseau de générateurs au sol d'AgI de maille 10 km, chaque générateur émettant 9 g d'AgI par heure, fonctionne pendant les 3 heures qui précèdent les chutes de grêle dans la zone de développement des orages, l'énergie cinétique des chutes ponctuelles de grêle est diminuée d'environ 50%, et la surface grêlée n'est pas augmentée. Il n'est encore pas possible de déterminer quel type d'orage répond plus ou moins bien à l'ensemencement, mais il est rassurant de savoir que l'efficacité est calculée pour les journées à grêle les plus violentes (avec plus de 15 chutes ponctuelles mesurées).

Sur le terrain, le système de traitement est simple à mettre en œuvre, une fois que l'aspect financier est réglé. Cependant, comme il est noté dans le manuel ASCE (2015), « le développement d'un réseau de

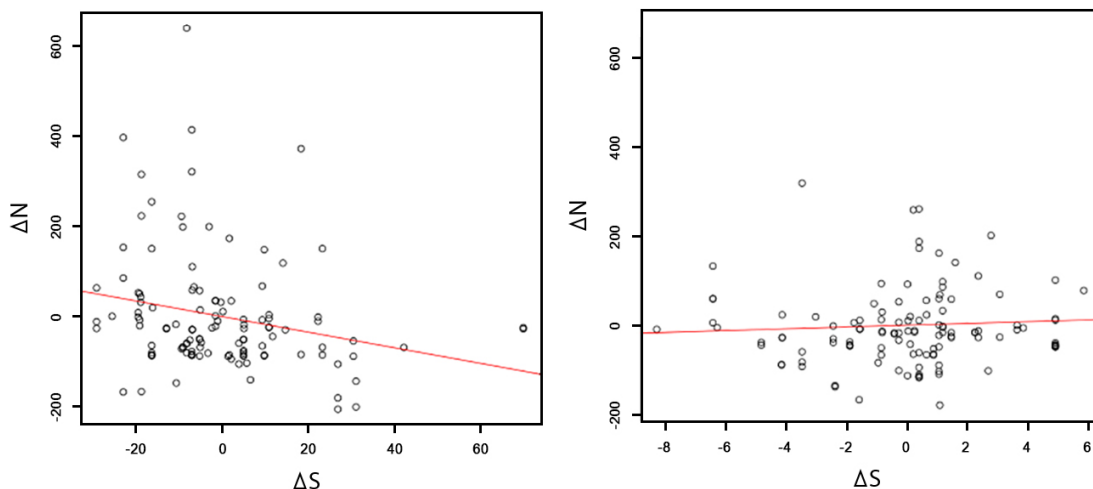


Fig. 10. Corrélation linéaire entre ΔN et ΔS .

A gauche : période avec ensemencement, 2000-2004. A droite : période sans ensemencement, 2005-2009.

générateurs au sol ne se limite pas à seulement déployer une douzaine de générateurs ». Les générateurs doivent être distribués non seulement dans la zone à protéger, mais aussi au-delà des limites de cette région pour les situations à orages à déplacement rapide. Les cellules doivent se nourrir en AgI dans la couche limite au moins 30 min (Espagne), ou 45 à 60 min (France) avant la grêle au sol, et dans certaines circonstances exceptionnelles les générateurs doivent être positionnés loin de la zone à protéger. Cependant, avant l'orage, le vent de basse couche est parfois de direction opposée au déplacement de l'orage, comme par exemple dans les plaines proches de Pyrénées (vents de vallée), ou dans les zones côtières (brises de mer), et cette situation permet un ensemencement plus proche. Dans les régions du monde proches de chaînes de montagnes élevées qui sont particulièrement sensibles aux orages à grêle violents, la position habituelle des ondes de montagne est toujours trouvée aux mêmes endroits (de la Torre et coll., 2015). Ce fait devrait être considéré pour mieux positionner les générateurs sous les courants ascendants de ces ondes. La seule contre-indication à l'ensemencement préventif pour la prévention de la grêle pourrait être le risque d'augmentation des précipitations orageuses, d'après les résultats du programme suisse et des simulations, mais des mesures de précaution peuvent être prises, comme par exemple ne pas semer lorsque des crues éclairées sont prévues. Les considérations écologiques liées à la présence de particules d'AgI dans l'air et dans l'eau de pluie ont été examinées (Williams et Denholm, 2009), y compris dans les programmes français et espagnols (Sánchez et coll., 1999). L'Organisation Météorologique Mondiale estime que « les études publiées n'ont montré aucun impact significatif de l'AgI utilisé dans les opérations de modification du temps, tant sur la santé humaine que sur l'environnement » (WMO, 2010). La Weather Modification Association a également conclu que « l'iodure d'argent tel qu'il est utilisé dans les programmes d'ensemencement des nuages est sans danger pour l'environnement » (WMA, 2009). Quoi qu'il en soit, moins il y a d'iodure d'argent relâché dans l'atmosphère, mieux c'est pour le principe de précaution, si ce n'est pour des considérations économiques.

Pour résumer, durant les 25 années écoulées, les preuves se sont accumulées que la prévention de la grêle est efficace, pourvu que l'ensemencement soit réalisé au tout début de la vie des cellules orageuses, et qu'il y ait une quantité suffisante de substance d'ensemencement dans la couche limite. Le niveau de signification du succès de la prévention de la grêle est à présent comparable à celui des effets du changement climatique. Le présent article n'avait pas pour intention de comparer les trois méthodes d'ensemencement des orages à grêle – depuis le sol, par avion, par fusées – mais suggère que l'efficacité moyenne de 50% mesurée

en France et en Espagne avec le système des générateurs au sol peut être comparée favorablement aux deux autres méthodes. Les résultats de chaque méthode dépendent des conditions géographiques, météorologiques et économiques. Avant de décider du choix de la méthode, on doit considérer les possibilités d'installer de nombreux générateurs sur une vaste région, ou de faire voler des avions ou lancer des fusées au-dessus de la région à protéger. On doit aussi estimer le rapport du bénéfice au coût attendu du programme. Par exemple, en Nouvelle Zélande, où on prévoit que le coût de la grêle va augmenter avec l'augmentation des surfaces couvertes par l'horticulture, Steiner (1988) considère que le système au sol devrait être retenu car il est facile à mettre en œuvre de façon routinière, qu'il est le moins dangereux et le moins gênant, et qu'il présente un rapport bénéfice à coût élevé. Une autre étude prospective réalisée pour les Pays Bas (Wieringa et Holleman, 2006) suggère que les générateurs au sol sont plus efficaces dans les régions où les bases des nuages d'orage sont habituellement basses.

Même avec la méthode la plus simple des générateurs au sol, la prévention de la grêle n'est pas une tâche facile. Avant de développer un réseau, plusieurs points sont à considérer, en particulier le système de financement, la possibilité de trouver des volontaires pour tenir les stations d'émission ou d'installer des générateurs automatiques en certains endroits, la méthode de prévision de la grêle à 4 heures d'échéance, enfin les charges administratives et techniques des réseaux de brûleurs et de grêlimètres. Avec la collaboration de l'ANELFA et de l'Université de León, des réseaux de générateurs ont été installés dans le sud de la Hongrie en 1991, dans la province de Santa Catarina, Brésil, en 1996, et dans la province de Mendoza, Argentine, en 2008 (au pied des Andes, en complément d'un système par avion). Des générateurs au sol sont également développés à grande échelle en Croatie, en complément du système par fusées, avec indication d'un effet positif de la prévention de la grêle (Pocakal et Stalek, 2003).

Les progrès de la prévention de la grêle par ensemencement à partir du sol dépendent principalement de la documentation régionale sur les violentes situations à grêle et sur leur prévision à 4 heures d'échéance. Les réseaux de grêlimètres peuvent être utiles à la détermination des conditions synoptiques et locales favorables aux fortes grêles, mais il faut rappeler que le temps de retour moyen des situations les plus extrêmes est de plusieurs années (Berthet et coll., 2013). Les modèles de trajectographie des parcelles d'air doivent aider à déterminer les positions stratégiques des stations d'émission pour les situations futures, et le calage des modèles numériques avec les mesures de la grêle permettra d'améliorer la prévision.

Remerciements

Nous remercions les opérateurs de générateurs et de grêlimètres pour leur contribution au progrès de la connaissance des orages à grêle. Lucía Hermida remercie pour l'aide du Fonds Social Européen,

Programme Opérationnel pour la Castille et León ; Nous remercions également le Ministère de l'Éducation et le Gouvernement Régional de la Castille et León.

Références

- Abshaev, M.T., Malkarova, A.M., 2003. Efficiency of Russian hail suppression technology in different regions. World Meteorological Organization, WMP 41, WMO/TD 1233, 99-107.
- Admirat, P., 1972. Diffusion théorique et expérimentale de noyaux d'iodure d'argent émis par des réseaux de générateurs. *J. Rech. Atmos.*, 6, 13-27.
- Admirat, P., Buscaglione, A., 1982. Computation of a "Storm Seeding Factor" for hail suppression by ground seeding. *J. Wea. Modif.*, 14, 18-22.
- ANELFA, 2013. Effet global des ensemencements sur la fréquence des chutes de grêle. Report N° 61, 75-77 (available on request at anelfa@anelfa.asso.fr).
- ASCE, 2003. Standard practice for the design and operation of hail suppression projects. American Society of Civil Engineers, EWRI/ASCE 39-03, 79 p.
- ASCE, 2015. Guidelines for operational hail suppression programs. American Society of Civil Engineers, ANSI/ASCE/EWRI 39-15, 51 p.
- Atlas, D., 1977. The paradox of hail suppression. *Science*, 195, 139-145.
- Balasch, S., Romero R., Ferrer, A., 2004. A logistic regression model applied to evaluate the influence of operating time of Agl ground acetonic generators on the size and hardness of hail. *Natural Hazards*, 32, 345-355.
- Berthet, C., Dessens, J., Sánchez, J.L., 2011. Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France. *Atmos. Res.*, 100, 391-400.
- Berthet, C., Wesolek, E., Dessens, J., Sánchez, J.L., 2013. Extreme hail day climatology in southwestern France. *Atmos. Res.*, 123, 139-150.
- Bigg, E.K., Turton, E., 1986. Delayed effects of cloud seeding with silver iodide. *J. Clim. Appl. Meteor*, 25, 1382-1386.
- Bigg, E.K., Turton, E., 1988. Persistent effects of cloud seeding with silver iodide. *J. Appl. Meteor.*, 27, 505-514.
- Boe, B.A., Stith, J.L., Smith, P.L., Hirsch, J.H., Helsdon, Jr, J.H., Detwiller, A.G., Orville, H.D., Martner, B.E., Reinking, R.F., Meitin, R.J., Brown, R.A., 1992. The North Dakota Thunderstorm Project: A cooperative study of High Plains thunderstorms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 145-160.
- Borland, S.W., 1977. Hail suppression: Progress in assessing its costs and benefits. *Meteor. Monogr.*, No 38, 155-175.
- Bruintjes, R.T., Clark, T.L., Hall, W.D., 1995. The dispersion of tracer plumes in mountainous regions in Central Arizona: Comparisons between observations and modeling results. *J. Appl. Meteor.*, 34, 971-988.
- Burtsev, I.I., 1985. Crop protection against hail damage in the USSR. World Meteorological Organization, WMP Report N° 2, 613-623.
- Carrió, G.G., Cotton, W.R., Loftus, A.M., 2014. On the response of hailstorms to enhanced CCN concentrations. *Atmos. Res.*, 143, 342-350.
- Castro, A., Marcos, J.L., Dessens, J., Sánchez J.L., Fraile, R., 1998. Concentration of ice nuclei in continental and maritime air masses in León (Spain). *Atmos. Res.*, 47-48, 155-167.
- Changnon, S.A., 1971. Hailfall characteristics related to crop damage. *J. Appl. Meteor.*, 10, 270-274.
- Changnon, S.A., 1977. On the status of hail suppression. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 58, 20-28.
- Chen, B., Xiao, H., 2010. Silver iodide seeding impact on the microphysics and dynamics of convective clouds in the high plains. *Atmos. Res.*, 96, 186-207.
- Curic, M., Janc, D., Vuckovic, V., 2007. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 95, 179-193.
- DeFelice, T.P., 2016. Advanced technology for cloud seeding. Cloud seeding and environmental impacts. *Atmos Res.* (to be submitted).
- de la Torre, A., Pessano, H., Hierro, R., Santos, J.R, Llamedo, P., Alexander, P., 2015. The influence of topography on vertical velocity of air in relation to severe storms near the Southern Andes Mountains. *Atmos. Res.*, 156, 91-101.
- Dennis, A.S., 1977. Hail suppression concepts and seeding methods. *Meteor. Monogr.*, N° 38, 181-191.

- Dennis, A. S., 1980. Weather modification by cloud seeding. Academic Press, International Geophysics Series, 24, 267 p.
- Dennis, A.S., Koscielski, A., 1972. Height and temperature of first echoes in unseeded and seeded convective clouds in South Dakota. *J. Appl. Meteor.*, 11, 994-1000.
- Dennis, A.S., Brown, B.G., Miller, J.R, Jr, 1981. Variations in rainfall and insured crop-hail losses associated with operational cloud seeding in South Dakota. *J. Wea. Modif.*, 13, 150-160.
- Dessens, H., 1953. La lutte antigrêle. Rapport sur la campagne 1952. Association d'Etudes des Moyens de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques, Report N° 1, 9-32 (available on request at anelfa@anelfa.asso.fr).
- Dessens, H., 1960a. La grêle et sa prévention. Association d'Etude des Moyens de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques, Report N° 10, 1-13 (available on request at anelfa@anelfa.asso.fr).
- Dessens, H., 1960b. Severe hailstorms are associated with very strong winds between 6,000 and 12,000 meters. *Amer. Geophys. Union, Monograph N° 5*, 333-338.
- Dessens, H., 1961. Le générateur de noyaux d'iodure d'argent de l'Association d'Etudes. *Bull. Obs. Puy de Dôme*, N° 1, 23-40.
- Dessens, H., Dessens, J., Benech, B., 1968. Poursuite dans l'atmosphère des noyaux d'iodure d'argent émis à partir du sol. *La Météorologie*, II-2, 171-184.
- Dessens, H., Dessens, J., Lacaux, J.P., 1970. Contrôle d'une expérience de lutte contre la grêle par analyse d'une courbe double-masse des pourcentages de dégâts. *J. Rech. Atmos.*, 4, 71-74.
- Dessens, J., Pham van Dinh, 1968. Le générateur à vortex. *J. Rech. Atmos.*, 3, 215-224.
- Dessens, J., 1986a. Hail in Southwestern France. I: Hailfall characteristics and hailstorm environment. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25, 35-47.
- Dessens, J., 1986b. Hail in Southwestern France. II: Results of a 30-year hail prevention project with silver iodide seeding from the ground. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25, 48-58.
- Dessens, J., 1998. A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground generators in southwestern France. *J. Appl. Meteor.*, 37, 1588-1599.
- Dessens, J., Berthet, C., Sánchez, J.L, 2006. A sensitivity test for hail prevention assessment with hailpad measurements. *J. Wea. Modif.*, 38, 44-50.
- Dessens, J., Berthet, C., Sánchez, J.L., 2009a. Mitigation of hail damages by cloud seeding in France and Spain. 5th Conference on Severe Storms, 12-16 October 2009, Landshut, Germany, 1-2.
- Dessens J., Berthet, C., Sánchez J.L., 2009b. Seeding optimization for hail prevention with ground generators. *J. Wea. Modif.*, 41, 104-111.
- Dinevich, L., Ingel, L., Khain, A., 2011. Evaluations of vertical transport of ice-forming particles produced by ground-based generators. *J. Scient. Israel-Technological Advantages*, 13, N° 1, 95-107.
- Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2015. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Farley, R.D., Orville, H.D., 1986. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth: Part. 1. Preliminary model verification and sensitivity tests. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 2014-2035.
- Farley, R.D., 1987. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part. 3: Simulation of an Alberta Hailstorm – Natural and seeded cases. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 789-812.
- Farley, R.D., Chen, H, Orville, H.D, Hjelmfelt, M.R, 2004. Numerical simulation of hail formation in the 28 June 1989 Bismarck thunderstorm. Part II: Cloud seeding results. *Atmos. Res.*, 71, 81-113.
- Federer, B., 1977. Methods and results of hail suppression in Europe and in the USSR. *Meteor. Monogr.*, N° 38, 215-223.
- Federer, B., Waldvogel A., Schmid, WW., Schiesser, H.H., 1986. Main results of Grossversuch IV. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 917-957.
- Fraile, R., Sánchez, J.L., de la Madrid, J.L., Castro, A., Marcos J.L., 1999. Some results from the hailpad network in León (Spain): Noteworthy correlations among hailfall parameters. *Theor. Appl. Climatol.*, 64, 105-117.
- García-Ortega, E., López, L., Sánchez, J. L. Marcos, J. L. 2006. Microphysical analysis at the cloud edge of a severe hailstorm. *Atmos Res.*, 82, 337-349.
- Grandia, K.L., Davison, D.S., 1977. Increases in silver iodide attributable to ground generators: highlights of the 1975 Alberta ground generator experiment. *J. Wea. Modif.*, 9, 57-65.
- Grandoso, H.N., Iribarne, J.V., 1963. Experiencia de modificación artificial de granizadas en Mendoza. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Fasciculo 3 informes, 70 p.
- Grant, L.O., Schleusener, R.A., 1961. The occurrence and variability of ice forming nuclei during the hail season in northeastern Colorado as measured at 11,300 ft. M.S.L. at an upwind mountain station. *Nubila*, 4, 21-33.
- Griffith, D.A., Wilkerson, G.W., Risch, D.A., 1990. Airborne observations of a summertime, ground-based tracer gas release. *J. Wea. Modif.*, 22, 43-48.
- Heimbach, J.A., Jr., Stone, N.C., 1984. Ascent of surface-released silver iodide into summer convection, Alberta 1975. *J. Wea. Modif.*, 16, 19-26.

- Hwang, C.-S., 1978. On the interaction of convective clouds in seeded and non-seeded conditions. M.S. thesis, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, 92 p.
- Iribarne, J.V., Grandoso H.N., 1965. Experiencia de modificación artificial de granizadas en Mendoza. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. *Contribuciones Científicas, Serie Meteorología*, Volume 1, Numero 5, 32 p.
- Jiang, H., Yin, Y., Su, H., Shan, Y., Gao, R., 2015. The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at the top of Huangshan (the Yellow Mountains) in Southeast China using a newly built static vacuum water vapor diffusion chamber. *Atmos. Res.*, 153, 200-208.
- Knight, C.A., Foote, G.B., Summers, P.W., 1979. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado. Part IX: Overall discussion and summary in the context of physical research. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1629-1639.
- Koloskov, B.P., Korneev, V.P., Kleimenova, A.V., Sergeev, B.N., Shapovalov, A.V., 2011. Numerical simulation of seeding material dispersion by ground-based AgI generators in mountainous terrain. 10th WMO Scientific Conference on Weather Modification, Bali, Indonesia, 4-7 October 2011. *Proceedings*, 116-117.
- Krauss, T.W., 2003. Aircraft seeding technology and some outstanding issues of hail suppression. Meeting of experts on hail suppression (in collaboration with Roshydromet). World Meteorological Organization, WMP 41, WMO/TD 1233, 57-61.
- Krick, I.P., 1954. Hail suppression, Theory and Practice. American Institute of Aerological Research, Water Resources Development Corporation, Report No 222, 13 p.
- Long, A.B., 2001. Review of persistence effects of silver iodide cloud seeding. *J. Wea. Modif.*, 33, 9-23.
- López, L., García-Ortega, E., Sánchez, J. L. 2007: A short-term forecast model for hail. *Atmos Res.*, 83, 176-184.
- López, L., Sánchez, J. L. 2009. Discriminant methods for radar detection of hail. *Atmos. Res.* 93, 358-368.
- Mason, B.J., 1971. *The Physics of Clouds*. Clarendon Press, Oxford, second edition, 671 p.
- Mather, G.K., Bigg, E.K., Renton, S., 1990. Apparent persistence effects in the Nelspruit area from silver iodide seeding for hail suppression. *J. Appl. Meteor.*, 29, 806-811.
- McPartland, J., Super, A., 1978. Diffusion of ground-generated silver iodide to cumulus cloud formation levels. *J. Wea. Modif.*, 10, 71-76.
- Mesinger, F., Mesinger, N., 1992. Has hail suppression in eastern Yugoslavia led to a reduction in the frequency of hail? *J. Appl. Meteor.*, 31, 104-111.
- Moreau, J., 1983. La lutte contre la grêle. Dix-septième congrès de l'Association Internationale des Assureurs contre la Grêle, Sorrento, 35 p.
- Mosmann, V. Castro, A., Fraile, R., Dessens, J., Sánchez J.L., 2003. Detection of statistically significant trends in the summer precipitation of the mainland Spain. *Atmos Res.* 70, 43-53.
- Mossop, S.C., Tuck-Lee, C., 1968. The composition and size distribution of aerosols produced by burning solutions of AgI and NaI in acetone. *J. Appl. Meteor.*, 7, 234-240.
- Mossop, S.C., Jayaweera, L.F., 1969. AgI-NaI aerosols as ice nuclei. *J. Appl. Meteor.*, 8, 241-248.
- Orville, H.D., Farley, R.D., Kopp, F.J., 1991. The simulation of cloud seeding effects using numerical cloud models. *J. Wea. Modif.*, 23, 17-26.
- Pham van Dinh, 1969. Contribution à la technologie des modèles de dilution des noyaux d'iodure d'argent. *J. Rech. Atmos.*, 4, 187-193.
- Pham van Dinh, 1976. La désactivation photolytique des particules d'iodure d'argent et leur dispersion atmosphérique à partir du sol. Une revue de 25 années de recherches. *J. Rech. Atmos.*, 10, 175-185.
- Pocakal, D., Stalec, J., 2003. Statistical analysis of hail characteristics in the hail-protected western part of Croatia using data from hail suppression stations. *Atmos. Res.*, 67-68, 533-540.
- Reinking, R.F., Martner, B.E., 1996. Feeder-cell ingestion of seeding aerosol from cloud base determined by tracking radar chaff. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1402-1415.
- Robitaille, F.E., Barlow, F.D., Renick, J.H., 1986. Cloud seeding with ground generators. 10th Conf. Weather Modif., Arlington, Virginia, May 27-30, 1986. *Proceedings*, 104-109.
- Rudolph, R.C., Sackiw, C.M., Riley, G.T., 1994. Statistical evaluation of the 1984-88 seeding experiment in northern Greece. *J. Wea. Mod.*, 26, 53-60.
- Sánchez, J.L., Dessens, J., Marcos, J. L., de la Fuente, M. T., Castro. A., 1998. Inadvertent precipitation modification in areas with ground generators network aimed at hail suppression: case of Ebro valley. *Proceedings of 14th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification*, Everett, WA, 17-22 August 1998. *Amer. Meteorol. Soc.*, J13 - J16.
- Sánchez, J.L., Dessens, J., Marcos, J.L., Fernandez, J.T., 1999. Comparison of rainwater silver concentrations from seeded and non-seeded days in León (Spain). *J. Wea. Mod.*, 31, 87-90.
- Sánchez, J. L. Gil-Robles, B., Dessens, J., Martin, E., López, L., Marcos, J. L., Berthet, C., Fernández, J.T., García-Ortega, E., 2009. Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina. *Atmos. Res.* 93, 641-654.

- Schaefer, V.J., 1946. The production of ice crystals in a cloud of super-cooled water droplets. *Science*, 104, 457.
- Schleusener, R.A., Koscielski, A., Dennis A.S., Schock, M.R., 1972. Hail experience on eight project seasons of cloud seeding with silver iodide in the northern Great Plains. *J. Rech. Atmos.*, 6, 519-528.
- Schmid, P., 1967. On « Grossversuch III », a randomized hail suppression experiment in Switzerland. *Proc. 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 5, University of California Press, Berkeley, 141-159.
- Serra, L., 1954. Diffusion dans l'atmosphère des noyaux d'iodure d'argent. *Bull. Obs. Puy de Dôme*, N° 3, 65-76.
- Simeonov, P., 1996. An overview of crop hail damage and evaluation of hail suppression efficiency in Bulgaria. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1574-1581.
- Smith, P.L., Orville, H.D., Boe, B.A., Stith, J.L., 1992. A status report on weather modification research in the Dakotas. *Atmos. Res.*, 28, 271-298.
- Smith, P.L., Johnson, R.L., Priegnitz, D.L., Boe, B.A., Mielke, P.W., Jr, 1997. An exploratory analysis of crop hail insurance data for evidence of cloud seeding effects in North Dakota. *J. Appl. Meteor.*, 36, 465-473.
- Soulage, G., 1957. Augmentations du pouvoir glaçogène de l'air réalisées au cours d'expériences de prévention de la grêle. *Bull. Obs. Puy de Dôme*, N°1, 121-141.
- Soulage, G., 1963. Augmentation du pouvoir glaçogène de l'air et diminution des dégâts occasionnés par la grêle. *J. Rech. Atmos.*, 1, 69-76.
- Soulage, G., 1968. Mesure du pouvoir glaçogène et modification des nuages. *J. Rech. Atmos.*, 141-145.
- Steiner, J.T., 1988. Can we reduce the hail problem? *Weather and Climate*, 8, 23-32.
- Sulakvelidze, G.K., Kiziriya, B.I., Tsykunov, V.V., 1974. Progress of hail suppression work in the USSR. *Weather and Climate Modification*, W.N. Hess, Editor. John Wiley & Sons, Inc., 410-431.
- Super, A.B., McPartland, J.T., Heimbach, J.A., 1975. Field observations of the persistence of AgI-NH₄I- acetone ice nuclei in daylight. *J. Appl. Meteor.*, 14, 1572-1577.
- Tlisov, M.I., Khuchunaev, B.M., 2003. Estimation of hail suppression effect on data of hail-pad network. *World Meteorological Organization, WMP 41, WMO/TD 1233*, 119-120.
- Vali, G., 1985. Atmospheric ice nucleation – A review. *J. Rech. Atmos.*, 19, 105-115.
- Vonnegut, B., 1947. The nucleation of ice formation by silver iodide. *J. Appl. Physics*, 18, p. 593.
- Wieringa, J., Holleman, I., 2006. If cannons cannot fight hail, what else? *Meteor. Zeitschrift*, 15, 659-669.
- Williams, B.D., Denholm, J.A., 2009. An assessment of the environmental toxicity of silver iodide – with reference to a cloud seeding trial in the snowy mountains of Australia. *J. Wea. Modif.*, 41, 75-96.
- WMA, 2009. Weather Modification Association (WMA) position statement on the environmental impact of using silver iodide as a cloud seeding agent. July 2009 (<http://www.weathermodification.org>).
- WMO, 1996. Meeting of experts to review the present status of hail suppression, Golden Gate Highlands National Park, South Africa, 6-10 November 1995. *World Meteorological Organization, WMP 26, WMO/TD – N° 764*, 39 p.
- WMO, 2006. Meeting of experts on hail suppression, Nalchik, Russian Federation, 27 Sept.-2 Oct. 2003. *World Meteorological Organization, WMP 41, WMO/TD - N°1233*, 188 p.
- WMO, 2010. Executive summary of the WMO statement on weather modification. *WMO documents on weather modification, Abu Dhabi*, 22-24 March 2010, 13 p.
- Yin, J., Wang, D., Zhai, G., 2011. Long-term in situ measurements of the cloud-precipitation microphysical properties over East Asia. *Atmos. Res.*, 102, 206-217.
- Young, K.C., 1977. A numerical examination of some hail suppression concepts. *Meteorol. Monogr.*, 16, 195-214.
- Yuter, S.E., Houze R.A., Jr., 1995. Three-dimensional kinetic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part. III: Vertical mass transport, mass divergence, and synthesis. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1964-1983.
- Zipori, A., Rosenfeld, D., Shpund, J., Steinberg, D.M., Erel, Y., 2012. Targeting and impacts of AgI cloud seeding based on rain chemical composition and cloud top phase characterization. *Atmos. Res.*, 114-115, 119-130.



*Association Nationale
d'Etude et de Lutte
contre les Fléaux Atmosphériques*

Siège Social :

52 rue Alfred-Duméril - 31400 TOULOUSE

☎ 05.61.52.05.65

📠 05.62.26.71.24

e-mail : anelfa@anelfa.asso.fr

www.anelfa.asso.fr