

Programme AL GHAIT d'augmentation des précipitations d'hiver

Par K. Essaouini

AMIMET

Direction de la Météorologie Nationale;

B.P.8106; Casa-Oasis; Casablanca-Maroc

I. HISTORIQUE

Lancé en 1984 à l'initiative de Feu Sa Majesté le Roi, Hassan II, le programme AL GHAIT a pour objectif l'augmentation des précipitations d'hiver sur le Haut Atlas Central et la recherche en matière de physique appliquée des nuages. Les activités du Programme se sont échelonnées depuis en trois grandes phases décrites ci-après.

I.1 La phase de coopération MAROCO-AMÉRICAINNE

Elle s'est poursuivie sur 5 ans, entre 1984 et 1989, dans le cadre d'un protocole d'accord entre le gouvernement Marocain et le gouvernement des Etats-Unis d'Amérique à travers l'Agence Américaine pour le développement USAID. Durant cette phase, le transfert de technologie s'est effectué en parallèle avec les activités opérationnelles d'ensemencement des nuages et avec les études de recherche.

A son terme, un rapport général a été élaboré, décrivant l'ensemble des aspects techniques, scientifiques, et économiques relatifs à cette phase. Les conclusions tirées de cette première phase montrent l'existence d'un potentiel encourageant de pluie additionnelle pouvant être obtenue par recours à la nouvelle technologie de modification artificielle du temps.

I.2 La phase de prolongation (1990-1995)

Cette phase a été conduite à la seule charge du gouvernement Marocain. Elle a été marquée par la nomination par Feu S.M. le Roi Hassan II de Monsieur le Général de Corps d'Armée Housni Benslimane comme coordonnateur du Haut Comité Directeur National du Programme AL GHAIT, successeur de feu le Général Mohammed Kabbaj.

L'objectif assigné à cette seconde phase est de conduire le maximum d'opérations d'ensemencement et de collecter les données nécessaires pour aboutir à des résultats détectables "en terme statistique" sur le terrain. En plus des procédés basés sur l'outil statistique, des études d'évaluation physico-chimique ont été élaborées pour consolider les résultats statistiques.

La campagne 1994-1995 a coïncidé donc avec la onzième année du Programme AL GHAIT et la cinquième année de la phase de prolongation. Elle constituait ainsi l'année "théoriquement" finale de la période expérimentale du Programme, car, selon les conclusions de la première phase, trois à cinq années supplémentaires devaient être suffisantes pour que les

résultats soient statistiquement significatif et ceci, bien entendu, dans le cas où les conditions climatiques régnantes, seraient favorables

I.3 La phase opérationnelle (1996-2001)

Durant cette phase les activités du programme étaient plutôt opérationnelles et se sont axées principalement sur les opérations d'ensemencement des nuages par des générateurs au sol.

Des études d'extension des activités du programme aussi bien spatiale (projet d'extension du programme au Nord du Royaume) que de domaine (Projet de lutte anti-grêle) ont été effectuées durant cette période.

Il faut noter que durant cette période le programme a été largement affecté par les limitations budgétaires. D'ailleurs c'est une constatation enregistrée même au niveau mondial, en effet l'OMM fait état de diminution de fonds alloués à la modification artificielle du temps dans le monde durant les années 90.

Par ailleurs, des opérations particulières ont été menées pour répondre à un besoin ponctuel au niveau national.

I.5 Opérations dans le Tangérois 1993 et 1995

La ville de Tanger a connu en 1993 et plus particulièrement en 1995, une sécheresse aiguë. En effet, le niveau du barrage Ibn Battouta alimentant la ville est descendu très bas en cote : 12 % en fin Avril 1993 et 6 % environ au même mois de l'année 1995. Représentant respectivement 4.7 et 2.4 millions de mètres cubes pour un besoin moyen de trois millions de mètres cubes par mois.

Devant cette situation, il a été décidé de mener des opérations d'ensemencement durant les mois d'Avril et de Mai. Durant la première campagne et en liaison avec deux épisodes propices, les résultats ont été satisfaisants; la cote a été portée à 26 % (12 millions de mètres cubes) garantissant ainsi l'alimentation normale jusqu'au mois de Novembre 1993 inclus. En revanche, pour la deuxième campagne, il n'a été constaté aucune évolution significative des réserves. En effet, le phénomène provenait de deux causes conjuguées :

1. des perturbations de moindre importance par rapport à l'année 1993;
2. l'état du sol, qui n'a permis aucun écoulement vers le barrage. Longtemps exposé au manque de précipitations, le sol absorbait l'eau par infiltration, tandis que le Chergui provoquait une évaporation excessive.

I. Introduction

Le Programme AL GHAIT de modification artificielle du temps a été mis en œuvre en 1983 pour alléger les effets de la sécheresse que le Maroc a connue entre 1979 et 1983. Les objectifs du Programme sont:

1. définir et mettre au point un programme scientifique d'ensemencement des nuages d'hiver pour alléger les conditions de sécheresse;
2. étudier les nuages et les processus de formation des précipitations pour améliorer la base scientifique du programme;
3. estimer la quantité d'eau additionnelle produite par l'ensemencement des nuages dans la zone cible.

Durant la première phase (1984-89) du Programme, les études microphysiques ont indiqué que les nuages ensemencables (i.e. favorables à l'ensemencement) sont souvent présents au Maroc durant la période de Novembre à Avril. En 1989, une évaluation multiple a été effectuée en examinant plusieurs aspects du Programme : statistique, hydrologique et économique.

Pour l'évaluation statistique, on a utilisé les données des débits, sous forme de moyennes mensuelles. Les résultats obtenus par la méthode "MRPP" ont indiqué que les opérations d'ensemencement devraient se poursuivre afin de permettre une évaluation plus sûre avec une probabilité de détection et un niveau de signification plus fiables.

En conséquence, il a été décidé de poursuivre le Programme AL GHAIT dans le but de collecter davantage de données et d'avoir une évaluation plus objective.

La zone cible est située dans la région montagneuse du Haut Atlas et localisée entre les latitudes 31° et 33° Nord et les longitudes 5° et 7° Ouest avec une altitude moyenne d'environ 3000 mètres. La chaîne du Haut Atlas s'étend du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Les écoulements en provenance de l'Ouest favorisent le soulèvement orographique de l'air qui, à son tour, favorise la formation des nuages et des précipitations sur les montagnes.

Les opérations d'ensemencement sont conduites par la Direction de la Météorologie Nationale sous la coordination du Haut Comité Directeur National du Programme AL GHAIT durant la période de Novembre à Avril et ce depuis la campagne 1984-1985 en se basant sur la technique d'ensemencement des nuages par l'iodure d'Argent.

Les moyens opérationnels mis en œuvre comprennent deux avions des Forces Royales Air et un réseau de générateurs au sol installés en montagne dans la zone cible. L'un des deux avions est utilisé pour l'ensemencement à l'aide de deux brûleurs placés à bord et l'autre est utilisé pour l'ensemencement des nuages par le sommet. Le réseau des générateurs a été étendu de 7 à 15 en 1992.

Les nuages ensemencables sont définis comme ceux contenant de l'eau liquide surfondue et dont la température au sommet est comprise entre -5°C et -20°C.

Les observations de radiosondage sont effectuées quotidiennement à la station de Béni Mellal. Un radar météorologique situé à Khouribga, à une distance de 100 km à l'Ouest de la zone cible, est utilisé pour la surveillance des situations météorologiques.

Les études en matière de physique des nuages se sont basées principalement sur les données de haute résolution collectées au Maroc par l'avion Laboratoire de l'Université du Nord Dakota et l'avion Laboratoire King Air 100 des Forces Royales Air.

Les études chimiques ont été réalisées avec le concours précieux de l'Escadron Aérien et du Laboratoire scientifique et technique "LARATES" de la Gendarmerie Royale.

On citera essentiellement les résultats d'évaluation globale en termes physique et hydrologique, tout en décrivant au préalable les activités opérationnelles.

II. Aspect opérationnel

II.1- Nombre de jours d'intervention

Les critères d'ensemencement (Vent - Température - Humidité) et d'ensemencabilité (eau liquide surfondue - concentration en cristaux de neige) ne vont pas souvent de paire avec la fréquence des situations perturbées pluvieuses. En effet, il arrive fréquemment que lors d'une situation météorologique, les vents prennent des directions défavorables de secteur Sud ou Sud-Est (minimum sur Canaries ou Agadir) ou d'Est à Nord-Est (minimum au voisinage de Ouarzazate / Errachidia).

Le tableau ci-après illustre clairement ce constat : l'année normale 1987/88 a enregistré 42 jours d'intervention, alors que l'année pluvieuse 1990/91 n'en a connu que 33. L'année sèche 1986/87 a totalisé 30 jours opérationnels, contre 20 jours seulement durant l'année normale 1989/90.

Tableau : Répartition mensuelle du nombre de jours d'ensemencement sur le Haut Atlas central

Compagne / Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Total
1986 / 1987	0	0	9	9	4	4	26
1987 / 1988	6	8	8	9	5	1	37
1988 / 1989	4	0	3	6	6	6	25
1989 / 1990	4	6	2	0	0	0	12
1990 / 1991	3	9	2	9	8	1	32
1991 / 1992	1	0	0	7	8	4	20
1992 / 1993	1	3	7	7	6	3	27
1993 / 1994	10	4	4	9	1	0	28
1994 / 1995	2	0	0	5	4	7	18
1995 / 1996	4	9	13	10	6	1	43
1996 / 1997	2	9	8	0	6	6	31
1997 / 1998	7	9	5	1	1	2	25
1998 / 1999	0	7	11	6	5	1	30
1999 / 2000	6	3	2	0	0	7	21
2000 / 2001	1	8	7	1	4	5	26

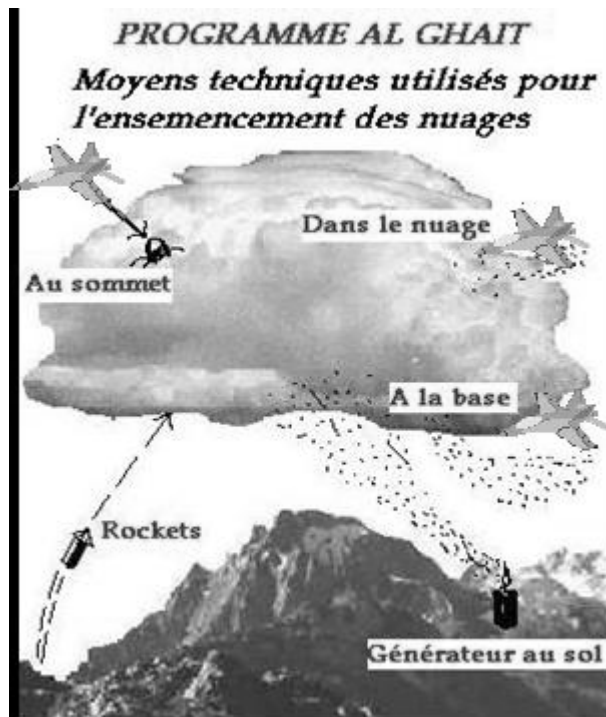
II.2- Vecteurs d'ensemencement

Durant les deux premières campagnes, le Programme a utilisé uniquement des moyens aériens avec des avions (OV.10) n'intervenant que de jour et en conditions VMC (Vol à vue). L'introduction de deux nouveaux avions (King Air 100) bien équipés, dont l'un est doté d'une instrumentation de physique des nuages, ont accru l'efficacité du système d'ensemencement.

II.3- Réseau des générateurs au sol

Le réseau des générateurs au sol a connu, lui aussi, un renforcement progressif en nombre en 1991/92 (de 7 à 9) puis en 1993/94 (de 9 à 15) ayant pour conséquence une couverture spatiale plus large de la zone cible.

Parallèlement, les conditions des sites ont été nettement améliorées rendant meilleure l'installation du personnel en haute montagne.



II.4- Produits chimiques

Le produit actif de base invariablement utilisé est l'Iodure d'Argent (Ag.I). A la suite du constat de quelques inconvénients d'ordre pratique (obstruction des sorties des générateurs aéroportés, temps de nucléation relativement long, etc.), le produit solubilisant Iodure d'Ammonium (INH_4) a été remplacé, dès la troisième campagne, par l'iodure de sodium Na.I. La concentration en Iodure d'Argent de même a été changée, de 4 % à 2 %, à partir de la troisième année du Programme.

Par ailleurs, en raison du développement du réseau des générateurs au sol, la consommation en produits chimiques a connu une augmentation sensible.

III - Evaluation Globale

III.1- Démarche

Les onze premières années du Programme ont permis la collecte d'une masse de données importante, allant de la microphysique des nuages aux débits dans les barrages en passant évidemment par les précipitations. Afin de mieux appréhender l'évaluation qui est de nature complexe, on a procédé à sa structuration sous forme d'une chaîne d'étapes complémentaires.

L'architecture de cette chaîne se compose de trois étapes :

- la première a pour objectif de vérifier les critères de la disposition des nuages aux traitements envisagés. Les données nécessaires aux analyses conduites pour la mise en évidence de cette étape ont été collectées in situ par les avions laboratoires Marocain et Américain. Le résultat de cette étape est formulé sous forme de potentiel d'ensemencement.

- la seconde a pour objectif de vérifier l'efficacité du procédé utilisé en terme de dispersion du produit chimique vers le nuage et la réponse de celui-ci au traitement par un changement de structure microphysique. Les indicateurs s'y afférents sont recherchés dans les mesures in situ et les analyses chimiques des manteaux neigeux en haute montagne.
- en bout de chaîne, la troisième étape vise à répondre à l'ultime question : y a-t-il eu ou n'y a-t-il pas eu augmentation dans le volume des précipitations / débits ? si oui, dans quelle proportion et avec quelle certitude ? La méthodologie pour ce faire a été dictée par plusieurs contraintes : la densité du réseau de mesures, la longueur des séries chronologiques et leur représentativité spatiale. Le choix a été porté sur les débits comme paramètre de réponse et la technique statistique comparative (double rapport, régression linéaire), comme moyen d'évaluation chiffrée.

III.2- Evaluation du potentiel d'ensemencabilité

Les données microphysiques et thermodynamiques ont été collectées à l'aide de l'avion de l'Université du Nord Dakota et l'avion King Air des Forces Royales Air pour déterminer le pourcentage des nuages ensemencables et étudier l'effet de l'ensemencement sur la structure microphysique des nuages. Les analyses présentées ci-dessous se basent sur les mesures de l'eau liquide surfondue, prise à l'aide de la sonde "Johnson Williams", et de la concentration des cristaux de neige enregistrée par un compteur optique, amélioré, des cristaux de neige.

Cette section présente l'analyse de l'eau liquide surfondue des portions nuageuses (régions nuageuses) contenant une teneur en eau supérieure à 0.05 g/m^3 . Les régions potentielles pour l'ensemencement (ROPS) ont été définies dans le cadre du projet d'augmentation des précipitations qui a été conduit par l'O.M.M. en Espagne comme celles qui répondent aux critères suivants:

- le contenu moyen en eau liquide surfondue "LWC" est supérieur à 0.1 g/m^3 sur une distance horizontale supérieure à 10 km, ou supérieure à 0.3 g/m^3 sur une distance plus petite;
- ces valeurs de "LWC" persistent au moins 10 minutes;
- l'extension verticale des nuages est supérieure à 1 km.

Comme approche d'analyse microphysique, une étude, de la distribution de l'eau liquide a été faite en utilisant les données de 210 épisodes nuageux pour lesquels le contenu en eau liquide surfondue dépasse 0.05 g/m^3 . La figure 3 montre qu'environ 70% de ces épisodes contiennent une moyenne d'eau liquide surfondue (ALWC) excédant 0.1 g/m^3 et environ 40 % contiennent une moyenne excédant 0.2 g/m^3 .

D'autre part, environ 50 % de ces épisodes présentent un maximum d'eau liquide surfondue (MLWC) supérieur à 0.5 g/m³. Ceci montre que l'eau liquide surfondue est relativement abondante et met en évidence l'existence d'un potentiel pour l'ensemencement. Ceci a été attribué à l'effet conjugué du soulèvement orographique et de l'existence d'une température relativement chaude à la base des nuages.

III.3- Evaluation de l'efficacité du système d'ensemencement

a- Analyse chimique

Le carottage est l'opération qui consiste à mesurer l'épaisseur et la densité de la neige en haute montagne. Faites par hélicoptère, les missions de ce type se font accompagner de chimistes afin de prélever des échantillons de neige, à différentes profondeurs et dans différents sites, pour être analysés ensuite au laboratoire.

Les analyses portent sur les concentrations des ions I⁻ et Ag⁺. Elles ont été effectuées au laboratoire d'analyses techniques et scientifiques "LARATES" de la Gendarmerie Royale. Les lieux de production des particules de l'Iodure d'Argent se situent à des altitudes inférieures de mille mètres à celles des sites de prélèvement des échantillons de neige. Les analyses chimiques font ressortir des concentrations des ions Ag⁺ dans la zone cible, de plusieurs ordres de grandeur, supérieures à celles mesurées dans la zone de contrôle (voir tableau 6 ci-après). Ce résultat confirme deux faits:

- le produit subit le soulèvement orographique;
- les précipitations contenant ce produit ont lieu dans la zone cible.

Tableau : Analyse chimique de la neige

Site	Concentration des ions Ag ⁺	
	Echantillons en surface	Echantillons en profondeur
Zone cible		
Jbel Azourqui	0.10	2.43 (33 cm en profondeur)
Jbel Laqroun	0.17	
Jbel Mouriq	0.57	
Zone de contrôle		
Jbel Oukimden	0.01	0.25 (27 cm en profondeur)

b- Analyse physique in situ

Une fois dans le nuage, le produit est censé augmenter les cristaux de neige. L'objectif de cette partie est de montrer que les nuages traités présentent des concentrations en cristaux de neige plus importantes que celles des nuages

non traités. Le résultat serait donc la stimulation ou le renforcement des processus de formation des précipitations dans les nuagesensemencés. L'échantillonnage se fait à la même température dans des nuages traités et d'autres qui ne le sont pas. On compare ensuite les concentrations des cristaux de neige.

Le tableau ci-après montre des rapports entre cinq et cent en faveur des nuages traités, et illustre une différence microphysique notable entre nuages traités et non traités pour des températures similaires. Ceci met en évidence un résultat physique positif.

Tableau : Effet microphysique de l'ensemencement

		Cas non ensemencés	Cas ensemencés	
Température T °C	Date	c.c.g.	Date	c.c.g.
-7	8/12/85	1	8/12/85	100
-7	4/03/88	1	4/03/88	80
-7	11/11/88	2	11/11/88	30
-11	24/10/85	0	24/10/85	20
-14	16/11/85	20	16/11/85	100
-14	9/12/85	10	9/12/85	80

c.c.g. : concentration des cristaux de neige en nombre / litre

III.4 - Evaluation statistique

a- Approche utilisée

L'évaluation statistique présentée ci-dessous est basée sur la comparaison des données hydrologiques de la zone cible avec celles de deux zones de contrôle. Les deux zones de contrôle ne sont pas contaminées par les opérations d'ensemencement courantes à cause de la direction du vent, sauf durant la période Novembre 1988 / Avril 1989 où des opérations d'ensemencement effectuées sur le Plateau d'Oulmès pouvaient contaminer, en faible proportion, la zone de contrôle Nord.

L'utilisation de deux zones de contrôle, l'une située au Nord de la zone cible, et l'autre située au Sud, permet une meilleure représentativité, étant donné que leur combinaison permet de considérer la majorité des systèmes nuageux touchant la zone cible. Ceci apparaît nettement lorsqu'on utilise la corrélation entre les données des débits de la zone cible et celles des deux zones de contrôle combinées. Ce coefficient de corrélation est de 0.96.

b- Méthodes statistiques

L'évaluation statistique présentée ici est basée sur les méthodes du double rapport d'une part et celle de la régression linéaire d'autre part. Pour cela, on utilise les données des débits mensuels du réservoir Bin El Ouidane situé dans la zone cible comme variable de réponse, et la somme des débits mensuels des réservoirs AI Kansera et Hassan Premier, situés respectivement dans la zone de contrôle Nord et dans celle du Sud, comme variable de contrôle. Dans ce qui suit, l'approche est appliquée aux campagnes comprises entre 1986 et 1991, à titre de référence.

b.1- Double rapport

Deux séries de données sont utilisées: la série historique correspondant à la période 1955-1984 et celle de la période d'ensemencement de Novembre 1986 jusqu'à Avril 1991. Les données d'entrée sont les moyennes des débits considérés de Novembre jusqu'à Mai pour les deux variables, contrôle et réponse. L'adjonction du mois de Mai vise la prise en compte de la fonte des neiges après la fin de campagne. Le double rapport (DR) est un indicateur statistique défini par

$$\mathbf{DR = (Ts/T) / (Cs/C),}$$

T et C sont respectivement les moyennes des données historiques de la période 1955-1984 pour les variables de réponse et de contrôle. Ts et Cs sont les variables correspondant à la période d'ensemencement. Le taux d'augmentation est donné par la formule:

$$\mathbf{R(\%) = (DR - 1) \times 100}$$

b-2- Régression linéaire

L'équation de la régression linéaire est obtenue à partir de l'analyse des corrélations statistiques faite sur les mêmes données et les mêmes périodes considérées ci-dessus. L'équation est alors: **Y= ax +b**

Y est la variable de réponse estimée et X est la variable de contrôle ; a et b sont les constantes de régression. Le taux d'augmentation est défini par:

$$\mathbf{R(\%) = ((Y_o/Y) - 1) \times 100,}$$

Y_o et Y désignent respectivement les valeurs observées et estimées de la variable de réponse moyennée sur la période 1986-1991. Le tableau ci-dessous résume les résultats des deux méthodes. On constate que le taux d'augmentation est égal à 18 % pour la méthode du double rapport et 14,3% pour la méthode de régression. Les études faites en 1989 à l'aide de la méthode "MRPP" ont indiqué que pour une période d'ensemencement de six ans et pour un taux d'augmentation donné de 15 %, la probabilité de détection (PDD) de 75 % peut être obtenue, avec un niveau de signification de 0,1, la probabilité de détection croît jusqu'à la valeur de 90%.

Tableau : Evaluation statistique

Méthode du Double Rapport	Période	B.E.O (m3/s)	H1 + EL Kansra (m3/s)
	a : 55-84	T = 50.6	C = 15.8
	b' : 86-91	Ts = 36.28	Cs = 9.46
		Ts / T = 0.71	Cs / C = 0.60
	%	71	60
DR = 1.18, Taux = DR -1 = 18%			
Méthode de la régression linéaire	Y théorique	Yo observées (1986-19991)	Y obs / Y th
	31.74	36.28	1.143
Taux		14.30	

b-3- Résultat sur l'ensemble de la période 1984-1995

En appliquant la méthode du double rapport sur la période **1984-1995** du Programme on obtient les résultats ci-après.

Pour la zone cible, le calcul des débits moyens et du rapport à la normale donne:

Ts = 30,74 ; c'est le débit moyen saisonnier (Nov-Mai) du barrage Bin El Ouidane sur la période 1984-1995;

Th = 50,6 ; c'est le débit moyen saisonnier (Nov-Mai) sur la période historique 1955-1984 ; on en déduit le rapport **Ts/Th = 0,60**.

Pour la zone de référence, le calcul des débits moyens et du rapport à la normale donne:

Cs = 7,5 ; c'est le débit moyen saisonnier (Nov-Mai) des. deux barrages AI kansra et Hassan Premier, pris en sommation, sur la période 1984-1995;

Ch = 15,8 ; c'est le débit moyen' saisonnier historique (Nov-Mai) des deux barrages AI Kansra et Hassan Premier, pris en sommation, sur la période 1955-1984, le rapport est donc égal à 0,47. Ce qui donne le double rapport 0,60/0,47 = 1.27, qui correspond à un taux d'augmentation de 27

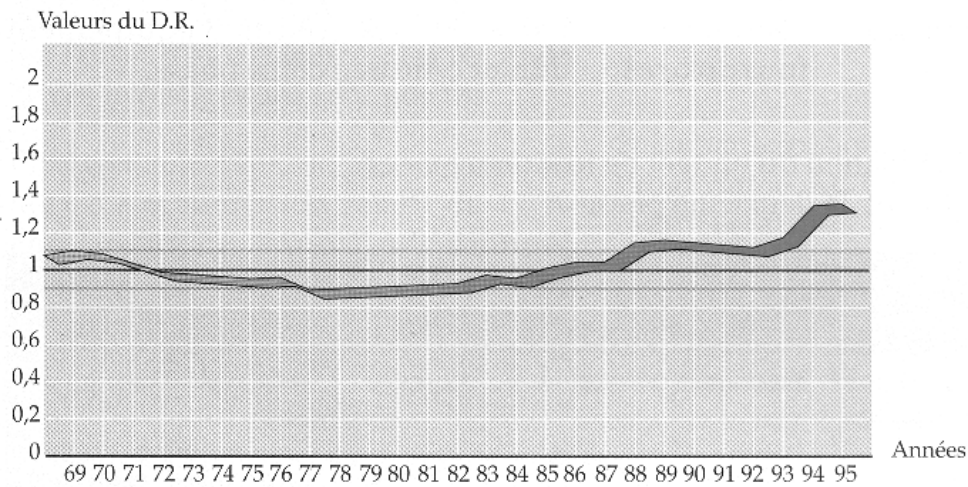
Représentativité du résultat

Une analyse de la variabilité statistique du double rapport a été conduite, cette analyse nous a permis d'étudier la représentativité du taux

d'augmentation déterminé auparavant. L'approche consiste à faire le même calcul du double rapport pour toutes les combinaisons de onze années successives prises dans la série 1955- 1995. celles-ci sont au nombre de 28.

La figure ci-après montre une oscillation autour de 1,0 de la valeur du double rapport dans la série de l'historique (1955-1984), avec un minimum de 0,91 et un maximum 1,10. A partir de 1986 la courbe devient quasi croissante et strictement supérieure à 1. Ce qui illustre un effet remarquable durant les années de la période de traitement des nuages.

Figure 4 - Courbe d'évolution du double rapport calculé sur toutes les périodes successives de 11 ans entre 1955 et 1995



Le taux d'augmentation calculé auparavant pour la période du Programme doit tenir compte de cette variabilité statistique, naturelle observée dans l'historique en introduisant un ajustement dans la formule de son calcul. L'ajustement à effectuer consiste à considérer les cas extrêmes, en l'occurrence ; le minimum et le maximum observés dans l'historique. Le double rapport ajusté DRaj se calcule par :

$$\mathbf{DRaj = DRo + (1-DRm)}$$

DRo et DRm sont respectivement le double rapport observé minimal et maximal. Ce qui donne un double rapport, situé entre 1,17 et 1,37, qui correspond à une augmentation située entre 17 % et 37 %.

b.4- Estimation du volume d'eau additionnel

En se mettant dans le cas le moins favorable et le plus vraisemblable, on adopte 17 % comme référence pour estimer le volume d'eau additionnel dans le barrage Bin El Ouidane. En considérant le débit moyen observé durant la période de traitement comme étant la somme du débit naturel moyen Tn et du débit additionnel moyen Ta, le double rapport s'écrit :

$$\mathbf{DR = ((Tn + Ta) / Th) \cdot 1 (Cs/Ch) = 1,17}$$

Ce qui donne : $Ta = (DR-1) \times Cs \times Th / Ch = 4,1 \text{ m}^3/\text{s}$. On en déduit un volume d'eau additionnel moyen de 74 millions de mètres cubes par saison (Nov-Mai), ou environ 800 millions de mètres cubes sur les onze premières années du Programme.

IV- Conclusion

Les différentes étapes suivies pour élaborer l'évaluation de la phase expérimentale du Programme AL CHAIT convergent sur des constats positifs et se consolident. Ainsi, le potentiel des nuages en eau liquide précipitable, la réponse des nuages au traitement en terme de variation de leur structure physique et enfin l'accroissement des débits ont fait l'objet d'investigation: les résultats de ces investigations sont positifs. Plus concrètement, on a enregistré un taux d'augmentation relatif de **17 %** entraînant un apport additionnel moyen en eau de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble de la première période 1984-1995 (Nov-Mai), ce qui correspond à un volume total de **800 millions de mètres cubes**.

Le bilan général de la phase expérimentale se dresse comme suit :

1) La période expérimentale du Programme AL CHAIT a permis :

- de mener des études scientifiques qui ont permis de dégager des connaissances nouvelles sur la physique de formation des précipitations au Maroc;
- de capitaliser une expérience en matière de conception, d'organisation, de conduite et d'évaluation des activités de la modification artificielle du temps pour l'accroissement de la pluie;
- d'aboutir à des résultats positifs comparables à ceux obtenus par d'autres programmes étrangers similaires, notamment un taux d'augmentation relatif moyen (i.e. tout en tenant compte des déficits dus aux sécheresses) de 17 % dans les débits du barrage Bin El Ouidane détecté par l'évaluation statistique;
- de connaître la portée et les limites de cette technologie en relation avec les conditions climatiques et les types des nuages.

2) La participation active des cadres du Programme AL CHAIT aux diverses manifestations scientifiques internationales ayant trait au domaine de la physique des nuages et de la modification artificielle du temps a procuré au Maroc une notoriété remarquable.

3) La mesure directe du taux d'accroissement des précipitations par l'ensemencement des nuages est encore universellement inaccessible ; ceci est dû au fait qu'il n'est pas encore possible de connaître au préalable la quantité que pourrait précipiter un nuage à son état naturel, et ce à cause de la grande variabilité du paramètre précipitation. Le recours aux méthodes indirectes, par

traitement statistique de la pluviométrie et / ou des débits demeure le seul moyen par lequel on peut estimer ce taux d'augmentation.

Certes, ces méthodes ne donnent pas la certitude absolue, mais permettent des estimations objectives. Ces estimations sont d'autant plus vraisemblables que le nombre d'années de traitement est grand.

Application des données avhrr et in situ pour le suivi de la sécheresse et de ses impacts sur l'agriculture au Maroc

Omar CHAFKI

Directeur Régional, Région Sud

Direction de la Météorologie Nationale, Agadir

Durant les dernières années, des sécheresses fréquentes et sévères sont devenues la principale catastrophe climatique au Maroc. Des sécheresses généralisées et sévères ont affectés le Maroc durant les 1982-1984, 1992, et 1994-1995, avec des impacts dévastateurs pour l'agriculture, les ressources en eau, l'économie nationale, l'industrie et l'environnement.

A cause du coût de plus en plus élevé des mesures d'atténuation, les dernières sécheresses ont attiré l'attention des gouvernements sur la sécheresse: suivi, occurrence, fréquence, durée, alerte précoce, prévision, impacts et gestion. La formation et la recrudescence de la sécheresse sont des processus graduels et cumulatifs, qui se développent si lentement qu'ils sont difficilement perceptibles.

Habituellement, on distingue quatre catégories pour la définition de la sécheresse: météorologique, agricole, hydrique et socio-économique. Mais, quelque soit sa définition, la sécheresse est généralement due à un manque de précipitations qui résulte en un déficit hydrique pour une activité où un groupe donné.

Les données météorologiques, et particulièrement les précipitations, sont actuellement la première source d'information largement utilisée pour le suivi de la sécheresse au Maroc. Cependant, le réseau météorologique est éparé, incomplet et non disponible continuellement à temps pour la détection de la sécheresse et son suivi. Les données satellitaires peuvent être utilisées comme complément aux données météorologiques pour le suivi de la sécheresse et l'estimation des rendements. Plusieurs études menées pour diverses parties du globe ont montré le potentiel des données satellitaires pour le suivi de la sécheresse et l'évaluation des impacts du climat.

Les systèmes satellitaires fournissent des données continues, dans l'espace et dans le temps, sur la plus grande partie du globe par l'utilisation de peu d'instruments. Ceci les rend potentiellement meilleurs et relativement économiques pour la cartographie de la sécheresse et l'estimation du rendement des cultures que les données météorologiques classiques. Cette étude se propose d'investiguer l'utilisation des données de télédétection,

particulièrement celles obtenues par l'AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) pour le suivi de la sécheresse et les impacts du climat au Maroc. Les objectifs spécifiques de cette étude sont:

1. Investiguer l'utilisation potentielle des données AVHRR comme outils pour la détection, la cartographie et le suivi de la sécheresse.
2. Investiguer la nature de la relation entre les données satellitaires et le rendement du blé au Maroc.

