

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE



FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :
MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Spécialité : Rayonnement atmosphérique

Par

M^r : ASSOUS NOUREDDINE

Thème

**Classification des échos radar par les réseaux
de neurones**

Soutenu publiquement le : 26/09/2004

devant le jury suivant :

BOUDRAA Malika

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Présidente

HADDAD Boualem

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Directeur de mémoire

SERIR Amina

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Examinatrice

BENGHANEM Mohamed

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Examinateur

OUSSAID Rachid

Docteur d'état à l'U.S.T.H.B.

Examinateur

Dédicaces

*Je dédie ce travail à toute ma famille,
à ceux qui m'ont aidé durant toutes mes années
d'études et à tous mes amis et mes collègues en particulier
ceux de la Team 04.*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement Mr B. HADDAD, Maître de Conférence à l'USTHB, pour avoir accepté de proposer et de diriger ce travail. Je tiens à lui témoigner mes reconnaissances pour son aide, sa disponibilité et ses conseils judicieux.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude à Mr ADANE Abd-El-Hamid, Professeur à l'USTHB, pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je tiens à remercier Mme BOUDRAA Malika, Maître de Conférences à l'USTHB qui a bien voulu présider le jury.

Je tiens à remercier Mr Mohamed BENGHANEM, Maître de Conférences à l'USTHB qui a accepté de faire partie de ce jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma très sincère reconnaissance.

Je remercie Mr Rachid OUSSAID Docteur d'Etat à l'U.S.T.H.B, qui a bien voulu examiner ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à Mme SERIR Amina, Maître de Conférences à l'U.S.T.H.B. Qu'elle en soit vivement remerciée.

Enfin, je remercie toutes les personnes du laboratoire rayonnement ainsi que mes amis et toute ma famille, pour leurs encouragements et soutien moral.

SOMMAIRE

Introduction	01
CHAPITRE I : Généralités sur les précipitations	03
1. Notions météorologiques sur les précipitations.....	03
1.1. Définition des précipitations.....	03
1.2. Processus de formation des précipitations.....	03
1.2.1. Processus de transfert ou effet Bergeron	04
1.2.2. Processus de captation ou coalescence	05
1.2.3. Effet de courbure	05
1.2.4. Effet de salinité.....	06
1.3. Répartition à la surface du globe	06
1.4. Types de précipitations	07
1.4.1. Précipitations stratiformes	07
1.4.2. Précipitations convectives	08
1.5. Classification des précipitations et nuages associés	08
1.5.1. La pluie	08
1.5.2. La bruine.....	09
1.5.3. La neige	09
1.5.4. La neige en grains	10
1.5.5. La grêle	10
1.5.6. Le grésil	10
1.5.7. Les averses.....	10
2. Mesure des précipitations	11
2.1. Le pluviomètre.....	11
2.2. Le pluviographe	12
3. Méthodes d'exploration de l'atmosphère	12
3.1 Stations météorologiques de surface	12
3.1.1 Notion d'échelles.....	12
3.1.2. Stations continentales	14
3.1.3. Stations maritimes	15
3.2. Stations météorologiques de radiosondage.....	15
3.3. Autres moyens d'exploration de l'atmosphère.....	16
3.3.1. Le radar.....	16
3.3.2. Les satellites.....	16
3.3.2.1. Satellites polaires.....	17
3.3.2.2. Satellites géostationnaires.....	17
3.3.3. Le lidar.....	18
3.3.4 Ballons sondes	19
3.3.5 Fusées météorologiques.....	19
3.3.6 Relevés effectués par avion	19
3.3.7. Cerf-volants	20
3.4. Collecte et transmission des données	20

CHAPITRE II : Le radar	23
1. Présentation	23
2. Principe de fonctionnement d'un Radar pulsé.....	23
2.1 Radar non cohérent	25
2.2 Radar cohérent	26
3. Caractéristiques du radar	28
3.1 La résolution	28
3.1.1 La résolution radiale	29
3.1.2 Résolution transversale.....	29
3.1.3 Volume de résolution de l'impulsion	30
3.2 Ambiguïtés du radar	30
3.2.1 Ambiguïté en distance et zone aveugle	30
3.2.2 Ambiguïté en vitesse	31
3.3 Visualisation des données.....	33
4. Equation radar.....	33
5. Choix du site.....	36
6. Angle de tir du radar	36
7. Application de l'équation radar en météorologie	36
8. La relation entre le facteur de réflectivité et l'intensité des précipitations	38
9. Conclusion	39
Chapitre III : Généralités sur les réseaux de neurone	40
1. Introduction.....	40
2. Réseau de neurones.....	40
2.1 Modèle biologique du neurone	40
a-Le corps cellulaire.....	41
b-Les dendrites.....	41
c-L'axone	41
2.2 Fonctionnement du neurone biologique	41
2.3. Modèle mathématique du neurone (neurone formel)	42
2.4 Construction des réseaux de neurones	44
2.4.1 Architecture des réseaux de neurones.....	44
2.4.2 Apprentissage des réseaux de neurones.....	45
a. La règle de Hebb (ou règle de corrélation)	46
b. La règle du perceptron	46
c. La règle de windrow-Hoff ou règle delta	47
d. Règle delta généralisée	48
e. L'apprentissage compétitif.....	49
2.5 Propriété des réseaux de neurones	50
a. La capacité d'apprentissage	50
b. La capacité de généralisation	50
c. Le parallélisme.....	50
2.6 Application des réseaux de neurones.....	50
3. Conclusion.....	51

CHAPITRE IV : Algorithme de Kohonen et application	52
à l'élimination des échos radar	
1. Introduction.....	52
2. Fondements neuro-biologiques.....	52
3. Conséquences	53
4. Algorithme de Kohonen	54
4.1 Fonctionnement du réseau	54
4.1.1 Phase d'apprentissage.....	55
4.1.2 Test de fin d'apprentissage	56
4.1.3 Initialisation aléatoire des poids	57
4.1.4 Choix aléatoire des exemples	57
4.1.5 Présentation de l'algorithme de Kohonen.....	57
4.1.5.1 Présentation de l'algorithme d'apprentissage	57
4.1.5.2 Etiquetage des neurones	58
4.1.6 Phase de reconnaissance	59
5. Variantes de l'algorithme	60
6. Application de l'algorithme de Kohonen	61
à l'identification des échos du sol	
6.1 Données expérimentales	61
6.2 Traitement des données	64
6.2.1 Analyse des différents échos.....	64
a. Le site de Sétif	64
b. Le site de Bordeaux	65
6.2.2 Adaptation de l'algorithme de Kohonen.....	66
à l'identification des échos de précipitation	
6.2.3 Les différentes étapes de l'algorithme de Kohonen.....	66
6.2.3.1 La phase d'apprentissage.....	67
a. Apprentissage de la forme des échos du sol	67
b. Apprentissage de la forme des nuages	68
6.2.3.2 La phase de reconnaissance	69
6.4 Résultats du filtrage	71
6.4.1. Etude du site de Sétif	72
a. les échos fixes séparé des échos de précipitations	72
Estimation du taux de filtrage.....	72
b. Les échos de précipitations au dessus des échos fixes.....	73
6.4.2. Etude du site de Bordeaux	73
a. Les échos de précipitation séparés des échos fixes.....	73
b. Les échos de précipitation en présence des	74
échos fixes et des échos A.P	
c. Les échos fixes et les échos A.P	74
d. Les échos de précipitations couvrent les échos fixes.....	75
7. Etude comparative entre les différentes.....	75
méthodes d'élimination d'échos du sol	
8. Conclusion.....	77
Conclusion générale	78

Liste des symboles

A : la surface effective de l'antenne radar

c : vitesse de la lumière dans le vide

C_{ij} : cellule de la carte de Kohonen

D : le diamètre des gouttes de pluie

$d_{ij}(e)$: la matrice distance euclidienne entre l'exemple $ex(e)$ et les différents neurones W_{ij}

$d_{*ij}(e)$: la matrice distance euclidienne entre l'exemple $ex^*(e)$ et les différents neurones W_{ij}

d_{ij} : la distance euclidienne entre $X(t)$ et W_{ij}

E : l'erreur quadratique

$e(t)$: signal radar émis

$ex(e)$: l'exemple d'ordre 'e' de la base d'apprentissage

$ex^*(e)$: l'exemple d'ordre 'e' de l'ensemble des exemples à traiter

$F^2(\theta, \varphi)$: fonction de distribution du gain normalisé

$f(P)$: fonction d'activation

f : la fonction d'activation

f_c : la fréquence de l'oscillateur cohérent

f_d : la fréquence Doppler

f_i : fréquence intermédiaire

f_r : la fréquence de répétition des impulsions

f_0 : la fréquence du signal radar

$G(\theta, \varphi)$: le gain de l'antenne radar

G_0 : le gain maximum de l'antenne radar

$I(\theta, \varphi)$: la densité de puissance électromagnétique rétrodiffusée par la cible

L : le facteur d'atténuation dans l'atmosphère

L_r : l'atténuation dans le récepteur radar

N : la taille de la carte de Kohonen

NbI : le nombre d'itérations

$N(t)$: le voisinage du neurone vainqueur

p : la puissance collectée par l'antenne radar

P_T : puissance total du signal radar émis

R : le taux de précipitation

r : la distance qui sépare la cible du l'antenne radar

$S=(s_1; s_2; \dots; s_n)$: le vecteur qui dénote la sortie réelle calculée

s : la sensibilité du radar

T_r : la période de répétition des impulsions

v_r : vitesse radiale du déplacement d'une cible

W_i : les poids des neurones

W_{ij} : le poids synaptique ou connexion entre i et j

W_{ij} : connexions externes de la cellule C_{ij}

W_v : le vecteur vainqueur

$X=(x_1; x_2; \dots; x_n)$: le vecteur d'entrée

X_i : les entrées des neurones

X_k ($k \sim 1..n$) : les composantes du vecteur d'entrée

$X(t)$: vecteur d'entrée à l'instant t

$Y=(y_1; y_2; \dots; y_n)$: le vecteur de sortie désirée

Z : le facteur de réflectivité radar

Z_e : l'écho radar effectif

Z_m : l'écho radar mesuré en dBZ

α : le taux d'apprentissage

$\alpha(t)$: le gain d'apprentissage

γ : momentun

Δt : le temps qui sépare l'impulsion d'émission de son écho à la réception

$\Delta_{i,j}(t)$: la valeur de modification du neurone $C_{i,j}$, à l'étape t

$\delta t = t / NbI$: l'unité incrémentale du temps t

$\delta_j^{[S]}$: l'erreur locale

ϵ_c : est la constante diélectrique de la particule de pluie

η : la réflectivité radar

θ_0 : ouverture du lobe principal du signal radar à 3dB en site

λ : la longueur d'onde du signal radar

σ : la section efficace de rétrodiffusion de la cible

$\sigma_\theta, \sigma_\phi$: les écarts types de la distribution gaussienne de la puissance dans le lobe principal

τ : largeur d'impulsion radar

$\Phi_r(t)$: phase du signal radar rétrodiffusé

φ_0 : ouverture du lobe principal du signal radar à 3dB en azimute

$d\Omega$: l'élément de l'angle solide

INTRODUCTION

En ce troisième millénaire, les exigences de la vie quotidienne de l'être humain deviennent de plus en plus complexes et variées. L'évolution rapide des demandes et besoins fait face à une démographie galopante imposant de nouvelles orientations en vue d'une exploitation rationnelle des ressources, et ceci pour éviter des guerres de plus en plus prévisibles. D'ailleurs, les experts en géostratégie l'attestent : « la première cause de guerre de notre siècle sera l'eau ». Parmi les ressources naturelles d'un pays, le climat constitue un patrimoine dont la connaissance est primordiale tant par son côté positif, c'est à dire comme sources de richesses renouvelables (eau, énergie solaire ou éolienne, etc...) que par les contraintes qu'il impose (phénomènes dangereux tels que les inondations ou les crues, transport de polluants etc...).

Tout au début de son existence, l'homme s'est basée sur son observation pour analyser les phénomènes météorologique. Pour que la connaissance à tous les niveaux des paramètres de l'atmosphère réponde aux besoins d'analyse et de prévision, il est nécessaire que cette observation soit, d'une part, étendue à toute la surface terrestre, d'autre part, effectuée de manière régulière. Ces exigences ne peuvent être généralement satisfaites dans des régions inhabitées tels que les océans, les déserts, les zones polaires ou les hautes montagnes, et sont sources souvent de difficultés, même dans les régions peuplées, en raison du coût élevé d'une observation humaine continue. Un effort considérable a été fait pour automatiser l'observation météorologique. Ainsi, ont été créés les stations automatiques synoptiques terrestres, qui, dotées de capteurs spécialement, effectuent et transmettent désormais des observations répondant aux normes requises. Depuis les années soixante, des efforts ont été faits en vue du développement technologique des fusées sondes et de l'instrumentation très particulière embarquée dans ces fusées et les ballons. Mais, il est désormais impossible de traiter de l'observation météorologique sans signaler la véritable révolution réalisée par la télédétection. Depuis l'avènement de cette nouvelle technique d'observation et de mesure, des avancées considérables sont réalisées dans le domaine de compréhension des phénomènes météorologiques, de la circulation générale dans l'atmosphère et dans la modélisation des phénomènes atmosphériques.

De nos jours, le radar météorologique est l'instrument le plus utilisé dans les stations météorologique de part le monde. En effet, il fournit une observation globale, permanente,

précise, cohérente et rapide des phénomènes météorologiques dans le temps et dans l'espace. Cependant, les images radar sont souvent contaminées par les échos en provenance de la surface terrestre, considérés par les météorologues comme des échos parasites. Ces derniers réduisent les capacités du radar à estimer les précipitations et à identifier les différents types de nuages. Les échos en provenance de la surface terrestre sont de deux types. Il s'agit des échos fixes observés autour du radar qui sont dus à des obstacles tels que les constructions, les pylons, les reliefs mais on peut observer pour certaines conditions météorologiques, des échos parasites à des distances dépassant de loin la zone radioélectrique de visibilité directe. Ces derniers sont causés par une propagation anormale des ondes radar dans la troposphère et sont appelés échos A.P. (anomalous propagation) ou anaprop. Diverses techniques d'élimination des échos en provenance de la surface terrestre sont proposées dans la littérature. Il s'agit principalement de la technique Doppler, de la technique polarimétrique, des circuits M.T.I. (Moving Target Indicator) ou de l'approche statistique. Dans ce travail, il est question de classer les échos radar en utilisant les réseaux neuronaux et plus précisément les cartes auto-organisatrices de Kohonen. L'objectif recherché est d'identifier les échos parasites en vue de leur élimination. Rappelons que les réseaux de neurones sont appliqués dans divers domaines tels que la robotique, la classification, l'optimisation, l'approximation et le traitement du signal. Deux sites radar ont été considérés. Les sites considérés dans cette étude sont des régions de Bordeaux (France) et de Sétif (Algérie). Compte tenu de cet objectif, nous avons organisé notre étude en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'atmosphère et les différents instruments utilisés pour son exploration.

Le second chapitre porte sur les divers types de radars météorologiques et leurs configurations électroniques.

Dans le troisième chapitre, nous avons rappelé les notions de base des réseaux de neurones.

Au quatrième chapitre, nous avons présenté les cartes auto-organisatrices de Kohonen et les résultats de leur application à la classification des échos radar et l'élimination des échos en provenance de la surface terrestre.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PRECIPITATIONS

Ce chapitre rappelle quelques notions météorologiques sur les précipitations, notamment leurs processus de formation, leurs types et leurs classifications.

1. Notions météorologiques sur les précipitations**1.1. Définition des précipitations**

On appelle précipitation, toute chute d'eau atmosphérique sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...).

Lorsque les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glaces d'un nuage ont une dimension trop importante, ils ne peuvent plus être maintenus par les courants ascendants au sein du nuage et ils vont alors tomber.

Les précipitations sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique «entrée» des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

1.2. Processus de formation des précipitations

Les hydrométéores qui se forment dans les nuages se produisent à des températures très basses, souvent inférieures à 0°C. C'est pour cette raison que presque toutes les précipitations qui arrivent au sol (liquide ou solide), proviennent de la formation de cristaux de glace (eau congelée). Si la température de l'air est supérieure à 0°C, ces précipitations fondent au cours de la chute. Dans le cas contraire, elles restent sous forme solide. Notons que dans 97% des cas, le nuage contient de la glace à son sommet, à une température inférieure à - 3°C. Dans 3% des cas, le nuage ne contient pas de glace mais de gros noyaux de condensation dont le diamètre varie de 2 à 40 microns. Le diamètre moyen d'une gouttelette de nuage est de 20 microns alors que le diamètre moyen d'une goutte de pluie est de 4 mm. Par conséquent, la question qui se pose est de savoir comment une gouttelette de nuage peut grossir jusqu'à devenir goutte de pluie. La formation des précipitations nécessite la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. La saturation constitue une condition essentielle à tout déclenchement de la condensation qui s'effectue de façon très lente et complexe. Divers processus

thermodynamiques sont susceptibles de réaliser la saturation, à savoir : par mélange et turbulences, refroidissement isobare (à pression constante), détente adiabatique, et apport de vapeur d'eau.

Cependant, la saturation n'est pas une condition suffisante à la condensation. Elle requiert, également, la présence de noyaux de condensation qui sont : les impuretés en suspension dans l'atmosphère d'origines variées, les suies volcaniques, les cristaux de sable, les cristaux de sels marins, les combustions industrielles, la pollution. Lorsque les deux conditions sont réunies, la condensation intervient sur les noyaux ; il y a alors apparition de gouttelettes microscopiques qui grossissent à mesure que se poursuit l'ascendance pour former des gouttes ou des cristaux. Les noyaux de condensation jouent donc le rôle de catalyseur pour la formation de gouttelettes d'eau.

Pour qu'il y ait précipitation, il faut que la masse des gouttelettes ou cristaux composant les nuages (les hydrométéores) devienne suffisante pour vaincre les forces d'agitation et obtenir des gouttes de pluie. Pour un stratus, cette épaisseur doit être d'au moins 500 m. Pour un cumulus ou un altostratus, elle doit être au moins égale à 1500 m (voir annexe A). Ce grossissement s'effectue principalement selon deux processus qui sont: le processus de transfert (effet Bergeron) et le processus de captation (coalescence). D'autres études de physique du nuage ont montré l'existence de phénomènes supplémentaires intervenant dans le grossissement des gouttes, à savoir, l'effet de courbure et l'effet de salinité. Ces différents processus peuvent être décrits de la manière suivante:

1.2.1. Processus de transfert ou effet Bergeron

Comme nous l'avons décrit, dans le paragraphe précédent, il y a cohabitation entre des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondues dans un nuage (eau liquide avec une $T < 0^{\circ}\text{C}$; l'eau pure ne se solidifie pas à 0°C mais en dessous de -40°C). Dans la partie du nuage où la température est négative mais supérieure à -40°C , coexistent des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondues. Autour d'un cristal de glace, l'air est saturé à un taux d'humidité plus bas qu'autour d'une gouttelette d'eau surfondue. Suite à cette différence d'humidité, il apparaît un transfert de la vapeur d'eau des gouttelettes vers les cristaux.

En effet, si une gouttelette d'eau surfondue s'évapore, la vapeur d'eau se trouve alors en excédent par rapport à l'équilibre vapeur-glace, et va donc se condenser immédiatement sur un cristal de glace. Donc, les gouttelettes s'évaporent tandis qu'il y a condensation autour des cristaux. Le cristal de glace grossit au détriment des gouttelettes d'eau surfondue : il y a

transfert en passant par la phase vapeur, entre gouttelette et cristal. Les cristaux de glace se développent au sein du nuage pour devenir flocons de neige qui précipiteront dès que leurs poids seront trop lourds pour être soutenus par les courants ascendants du nuage. Passant l'isotherme 0°C, ces flocons se retrouvent à des températures positives et fondent pour donner des gouttes de pluie. Si la température reste négative jusqu'au niveau du sol, les flocons ne fondent pas et il neige au lieu de pleuvoir. Le même processus de grossissement a lieu entre deux gouttelettes à des températures différentes (la plus froide grossit au détriment de la plus chaude). L'effet Bergeron est insuffisant pour expliquer la taille des grosses gouttes de pluie; il faudrait en effet seize heures à ce processus pour donner des gouttes de 4 mm de diamètre alors qu'un cumulonimbus peut donner de telles gouttes au bout d'une heure d'existence. L'effet Bergeron est capable de donner des cristaux de glace de 100 microns de diamètre mais un autre processus doit prendre le relais pour que la goutte de pluie ou le flocon de neige se développe d'avantage.

1.2.2. Processus de captation ou coalescence

Dans la partie supérieure du nuage, à température négative, existent simultanément des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondue. Le cristal se déplace au sein des gouttelettes (soit en chute libre, soit soulevé par les courants turbulents) et lorsqu'il entre en collision avec les gouttelettes, celles-ci se congèlent sur le cristal et en augmentent ainsi la taille. Le processus de coalescence a lieu également dans la partie du nuage où la température est positive et où il n'y a que des gouttelettes d'eau. Sous l'action de la pesanteur et de la viscosité, les grosses gouttes tombent plus vite que les petites et vont capter ces dernières. De collision en collision, le diamètre des gouttes augmente. La coalescence provoque une augmentation rapide de la dimension des gouttes. Ce processus intervient au départ en même temps que l'effet Bergeron jusqu'à permettre des gouttes de 200 microns. Au-delà, l'effet Bergeron n'intervient plus et seule la coalescence permet le grossissement des gouttes.

1.2.3. Effet de courbure

La tension de vapeur saturante au voisinage d'une gouttelette de petit diamètre est supérieure à celle au voisinage d'une gouttelette de grand diamètre. Une grosse gouttelette se comporte donc comme le cristal dans le processus Bergeron, et il se produira un transfert par la phase vapeur, des petites gouttelettes vers les grosses. Ce processus permet d'expliquer certaines précipitations des régions tropicales ainsi que la bruine des régions tempérées.

1.2.4. Effet de salinité

Les cristaux de sel des océans peuvent se retrouver dans l'atmosphère lorsque les embruns s'évaporent et constituer ainsi de bons noyaux de condensation. La tension de vapeur saturante au voisinage de l'eau salée est inférieure à celle au voisinage de l'eau pure. Les gouttelettes à forte salinité vont donc avoir tendance à absorber celles de salinité plus faible. Ce processus est cité pour mémoire car un simple raisonnement nous permet de comprendre qu'il devient très vite inefficace. En effet, au fur et à mesure que les gouttes fortement salées absorbent les gouttes d'eau pure, leur salinité diminue et l'efficacité du phénomène décroît assez rapidement. Ce processus pourrait expliquer l'importance de certaines bruines observées en bordure côtière.

Aucune de ces théories n'est suffisante pour expliquer à elle seule la totalité des précipitations, tous les processus fonctionnent plus ou moins simultanément et d'autres phénomènes interviennent comme la fragmentation des grosses gouttes en gouttes moins grosses, ce qui augmente encore l'efficacité du processus de coalescence. En effet, une goutte de pluie est soumise à des forces de frottement et de tension interne lorsqu'elle tombe et au-delà d'un certain diamètre, elle ne peut plus assurer sa propre cohésion et elle se fragmente en plusieurs gouttes de diamètre moindre.

1.3. Répartition à la surface du globe

Les régions équatoriales se distinguent par une quantité d'eau annuelle pouvant atteindre plusieurs mètres alors que les régions tempérées ne reçoivent que 600 à 1000 mm par an. Les masses d'air froides n'ont pas une grosse capacité à contenir de la vapeur d'eau, ce qui explique que les régions polaires reçoivent en général moins de 500 mm d'eau par an. Les régions tropicales, qui sont le siège de puissants anticyclones, sont des régions très sèches à cause de l'absence de nébulosité. On y relève une pluviosité de quelques mm par an seulement. Le record étant détenu par le désert d'Atacama au Chili où on a constaté une absence de pluviosité durant quatorze années consécutives. Le planisphère de la figure 1.1 montre la répartition des quantités d'eau recueillie à la surface du globe.

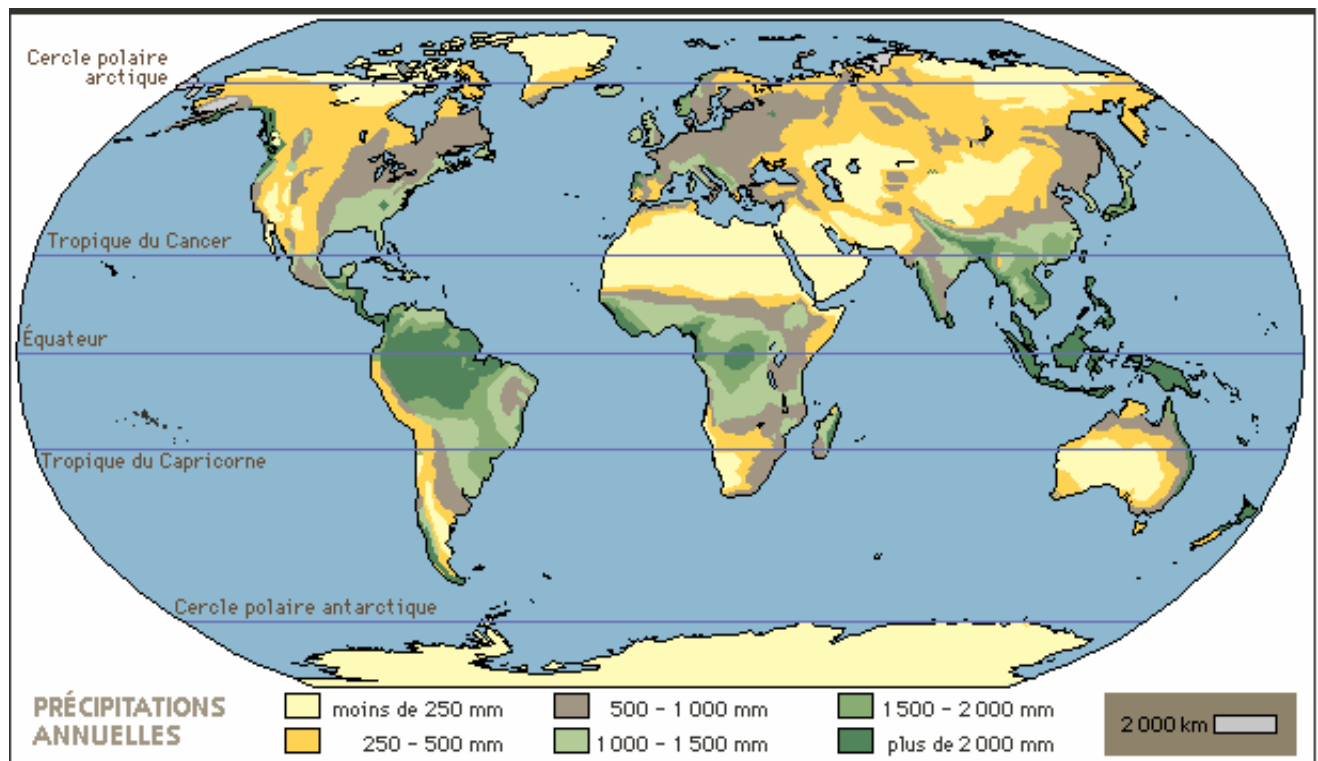


Fig. 1.1 : Répartition des précipitations annuelles à travers la surface du globe [Microsoft encarta 2001].

1.4. Types de précipitations

Toute précipitation nécessite la condensation de la vapeur d'eau. Mais lorsque les gouttelettes d'eau des nuages ont assez grandi, elles deviennent trop lourdes pour être supportées dans le nuage ; elles se mettent donc à chuter vers la terre. Trois éléments déterminent la forme finale sous laquelle elle se présente : ce sont les courants aériens, la température et l'humidité. Les précipitations sont classées en deux types :

1.4.1. Précipitations stratiformes

Ce sont des précipitations qui couvrent une grande étendue. Elles durent longtemps mais sont de faible intensité. Elles se produisent dans les zones de basse pression et les creux. Elles sont associées à des nuages de types « stratus ».

1.4.2. Précipitations convectives

Ce sont des précipitations qui couvrent des petites surfaces mais à fort développement vertical. Elles durent moins de trente minutes mais sont intenses. Elles sont très localisées et sont produites par l'instabilité convective de l'air. Elles sont associées à des nuages de types "cumulus".

1.5. Classification des précipitations et nuages associés

Les précipitations peuvent tomber sous trois formes:

- Précipitation liquide: pluie et bruine.
- Précipitation verglaçante: pluie verglaçante et bruine verglaçante.
- Précipitation solide: neige, neige en grains, grésil et grêle.

Dans ce qui suit, nous donnons les définitions de certaines formes de précipitations en commençant par «la pluie ».

1.5.1. La pluie

En anglais Rain, elle se note RA. Elle est constituée de gouttes d'eau liquides à température positive ou négative. Dans le dernier cas, la pluie se congèle sur toute surface et forme un dépôt de glace appelé verglas (on parle alors de pluie se congelant ou encore Freezing rain FZRA). Le diamètre des gouttes de pluie est généralement compris entre 0.5 et 6 mm, et l'intensité de la pluie ne subit pas de variations importantes au cours de la précipitation. Néanmoins, la pluie pourra être faible, modérée ou forte en fonction de la quantité d'eau qui tombe par unité de temps.

Les fines gouttelettes d'eau qui se condensent sur les particules de poussière pour créer un nuage sont séparées par des distances relativement grandes, si on compare ces distances à la taille de gouttelettes. Etant donné qu'il en existe des milliards, on a l'impression que le nuage forme une masse compacte. Plus les nuages montent vers des couches d'air plus froid, plus les gouttelettes grossissent et se rapprochent les unes des autres (On parle ici de gouttelettes, mais on doit noter qu'il est fort possible que ce soient des cristaux. De toute façon, la technique est la même). Quand la taille de la gouttelette atteint la grosseur d'un point de ponctuation (bruine), elle ne peut plus flouer et elle commence à descendre lentement, de l'intérieur du nuage vers sa base. Lorsque la taille de la gouttelette de bruine dépasse quelque peu la grosseur d'un point, elle se met à tomber plus vite. En d'autres termes, le poids des

gouttelettes entraîne leur chute. La température de la couche d'air à travers laquelle passent les gouttelettes étant supérieure à 0° et la température du sol étant aussi au-dessus de 0° alors c'est sous forme de pluie que ces gouttelettes atteignent le sol. S'il n'y a pas de vent et si la turbulence est négligeable à l'intérieur du nuage, la gouttelette conservera sa taille et atteindra le sol sous forme de faible pluie. Comme les nuages se trouvent à une altitude où la température est basse, il arrive souvent que les gouttelettes soient congelées dans le nuage et qu'elles fondent pendant leur chute vers le sol. Si, par contre, il y a de forts courants descendants présents dans le nuage, on assiste à une forte averse de pluie en rafales qu'on appelle aussi "grain". (Une averse de 10 mm équivaut à 10 litres d'eau /m carrés). Si la taille d'une goutte de pluie est supérieure à celle d'un petit pois vert, elle sera brisée par la friction de l'air dans sa chute vers le sol. La vitesse maximale qu'une goutte de pluie peut atteindre en tombant est de 30 km/h. C'est également la friction de l'air qui empêche la goutte de tomber encore plus vite.

1.5.2. La bruine

En anglais Drizzle, elle se note DZ. C'est une précipitation assez uniforme, constituée de gouttes d'eau très fines dont le diamètre est inférieur à 0.5 mm, très rapprochées les unes des autres et dont la vitesse de chute est très faible. Elle peut fournir des quantités d'eau assez importantes et peut aussi être constituée d'eau surfondue. Dans ce cas, elle se congèle sur toute surface à températures négative. La bruine est associée au Stratus ou bien au brouillard dont l'épaisseur dépasse 500 mètres.

1.5.3. La neige

En anglais Snow, elle se note SN. Elle est sous forme solide, constituée de flocons de neige qui sont des agglomérats de cristaux de glaces aux formes étoilées. Ces flocons dont la taille est généralement comprise entre 0.5 et 2.5 cm, ont une densité très faible du fait qu'ils referment beaucoup d'air en raison de leur forme étoilée; leur vitesse de chute est donc très faible et ils sont facilement soulevés par le vent. La neige ne s'observe que pour des températures négatives. En effet, pour les températures positives, le flocon aurait le temps de fondre avant d'arriver jusqu'au sol. Dans le cas des températures faiblement positives, une partie seulement des flocons aura le temps de fondre et on assiste alors à une précipitation de pluie et neige mêlée (RASN).

La neige tout comme la pluie donne des quantités moyennes d'eau précipitée de l'ordre

de 1mm/h.

1.5.4. La neige en grains

Notée SG, c'est une précipitation relativement rare, générée uniquement par le stratus et constituée de petits grains de glace opaque dont le diamètre ne dépasse généralement pas le millimètre. Tombant en très petites quantités, on la reconnaît au fait que le grain de neige rebondit en atteignant le sol.

1.5.5. La grêle

En anglais Hail, on la note pourtant GR. C'est une précipitation constituée de globules de glace compacte et dure (appelés grêlons) de forme plus au moins sphérique et dont le diamètre est généralement compris entre 5 mm et 5 cm. Seuls les cumulonimbus fortement développés verticalement sont capables de donner de la grêle dont le processus de formation fait intervenir de forts courants ascendants. La densité du grêlon est telle que sa vitesse de chute est élevée. Cette dernière est proportionnelle à la racine carrée du diamètre du grêlon:

On peut retenir comme ordre de grandeur qu'un grêlon de 3 cm de diamètre aura une vitesse de chute de 25 m/s.

1.5.6. Le grésil

C'est une précipitation de particules de glace transparente ou translucide, aux formes variables et dont le diamètre est inférieur à 5 mm. Le grésil se note GS.

1.5.7. Les averses

En anglais Shower, elle se note SI Toutes les précipitations dues à des nuages instables portent le nom d'averse et ont pour caractéristiques communes un début et une fin brusque, une durée courte pour une intensité qui présente des variations importantes et rapides. L'eau précipitée peut être liquide ou solide et on pourra donc avoir une averse de pluie, de neige ou de grêle. On peut aussi avoir une averse de pluie et neige mêlée si la température est faiblement positive comme nous l'avons expliqué précédemment.

On appelle virga, des précipitations en altitude qui n'atteignent pas le niveau du sol car l'eau précipitée a le temps de s'évaporer au cours de la chute. Elles apparaissent comme des virgules qui seraient accrochées à la base du nuage précipitant, ce qui leur vaut leur nom. Les virga indiquent en général la présence de turbulence due à des cisaillements de vents.

La table 1.1 résume les différents types de précipitations et indique le type de nuages qui les génèrent :

PRECIPITATION	NUAGES GENERATEURS	ABREVIATIONS
Bruine	St	DZ
Pluie	Ns, As	RA
Pluie se congelant	Ns, As	FZRA
Neige	Ns, As	SN
Neige en grains	St	SG
Averse de pluie	Cu,Cb, Ac	SHRA
Averse de neige	Cu, Cb, Ac	SHSN
Averse de grésil	Cu,Cb	GS
Averse de grêle	Cb	GR

Table 1.1 : Différents types de précipitation

2. Mesure des précipitations

La mesure des précipitations est simple à réaliser localement, mais elle reste l'une des plus complexes en météorologie du fait de la très forte hétérogénéité spatiale des précipitations. On exprime généralement les précipitations en hauteur ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale (mm) ou encore en intensité (mm/h). Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux instruments de mesures ponctuelles des précipitations qui sont le pluviomètre et le pluviographe.

2.1. Le pluviomètre

Il permet une mesure volumétrique de l'eau recueillie sur une surface horizontale bien déterminée. L'eau de pluie est directement recueillie dans un récipient gradué en dixième de millimètres (voir figure 1.2). Ce récipient est constitué d'une sorte d'entonnoir dont la surface est de 400 cm² qui déverse dans une éprouvette permettant des mesures allant de 0.05 à 8 mm. Pour des quantités d'eau précipitée plus importantes, l'éprouvette déborde dans un récipient plus grand dont la forme conique permet une meilleure précision de lecture de la mesure. La surface réceptrice du pluviomètre est installée à environ 1m au-dessus du sol, dans un endroit

relativement bien dégagé. La mesure des précipitations sous forme solide (neige, grêle) est évidemment possible après fusion de ces dernières.

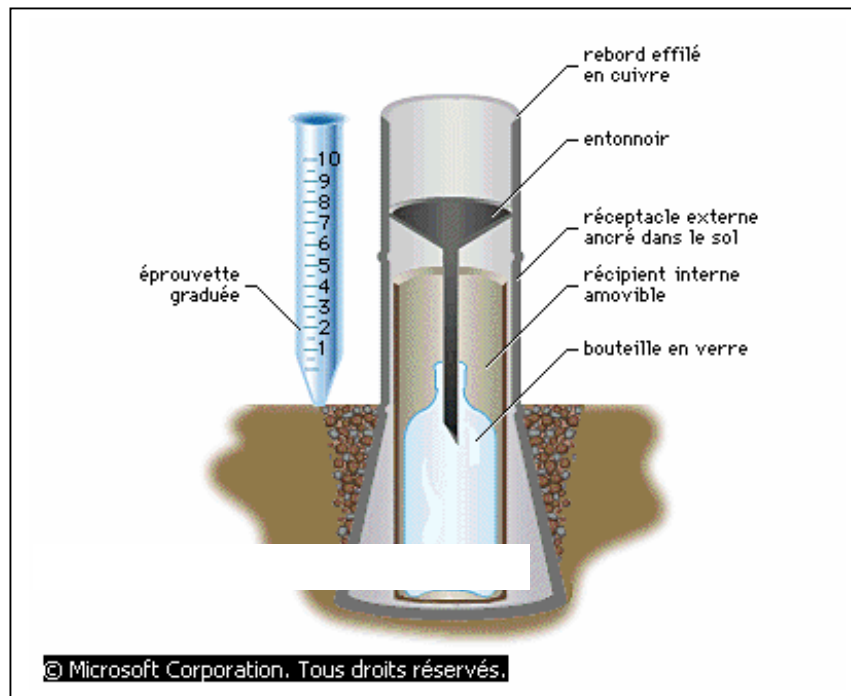


Fig. 1.2 : Le pluviomètre

2.2. Le pluviographe

C'est un instrument enregistrant la hauteur instantanée de la précipitation et permettant la détermination de l'intensité de la pluie.

3. Méthodes d'exploration de l'atmosphère

La connaissance de la structure de l'atmosphère nécessite des mesures in situ et par télédétection. Parmi les moyens utilisés, nous citons :

3.1 Stations météorologiques de surface

Avant de passer en revue les stations météorologiques, nous allons rappeler certaines notions nécessaires pour la mesure des paramètres physiques caractéristiques de l'atmosphère.

3.1.1 Notion d'échelles

La façon la plus simple de mesurer certains paramètres propres à l'atmosphère, est de disposer de stations d'observation régulièrement réparties à la surface du globe. Ces stations peuvent alors mesurer à heure fixe, les valeurs de pression, de température ou d'humidité ; ce

qui permet déjà de connaître l'état thermodynamique de la particule d'air située autour de la station. Le procédé a pourtant ses limites : on ne connaît rien des particules d'air situées en altitude et la connaissance de l'état de l'atmosphère au niveau du sol n'est pas suffisante pour alimenter un modèle de prévision météorologique. Une autre limite vient du fait qu'on ne peut pas répartir de façon régulière les stations à la surface de la Terre.

L'OMM (organisation météorologique mondiale) recommande une densité de station égale à une station tous les 150 Km. Or, il existe un déséquilibre entre les zones continentales et les zones maritimes (un tiers de continent pour deux tiers d'océan en gros). De plus, les continents sont très inégalement répartis entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, et les pays en voie de développement n'ont pas toujours un budget suffisant pour entretenir en hommes ou en matériel leurs stations d'observation.

Mis à part dans les pays industrialisés, cette densité de stations préconisée par l'OMM est donc loin d'être atteinte. De plus, même si on développait suffisamment les moyens pour y parvenir, cette densité serait tout de même nettement insuffisante pour observer et prévoir le temps à une échelle fine car de nombreux phénomènes météorologiques se développent sur des régions dont la taille est inférieure à 100 Km. Nous pouvons citer par exemple les averses, les orages, ou les tornades. On peut donc comprendre que la description de l'état de l'atmosphère dépend essentiellement de l'échelle choisie pour effectuer l'observation.

L'atmosphère, qui est un fluide en trois dimensions, peut être considérée comme une juxtaposition de particules élémentaires à l'intérieur desquelles les paramètres d'état et de mouvement sont répartis uniformément. Les dimensions choisies, pour chaque particule définissent l'échelle d'étude, le but étant de mettre en évidence les discontinuités des phénomènes observés. L'échelle la plus couramment utilisée en analyse ou en prévision météorologique est l'échelle synoptique. La particule synoptique correspond à un domaine minimal de l'atmosphère dont les dimensions sont quelques dizaines de minutes pour la durée. Cette échelle permettra d'étudier les phénomènes atmosphériques à grande échelle tels que les perturbations, les cyclones etc...On est donc amené à utiliser une échelle locale dont les dimensions de la particule sont encore réduites (quelques Km horizontalement, quelques mètres verticalement, et de l'ordre de la minute pour la durée).

A l'opposé, la climatologie s'intéresse plutôt à la représentation moyenne des phénomènes atmosphériques recouvrant de grandes régions du globe. Dans ce cas, c'est l'échelle planétaire qui permet de mettre en évidence les caractéristiques moyennes de l'écoulement de l'air. Les dimensions verticales sont de l'ordre de quelques centaines de

mètres. L'échelle de temps est le mois ou la saison.

On parle aussi de l'échelle aérologique, plutôt réservée à l'étude de l'atmosphère suivant la verticale et aux phénomènes de condensation, de turbulence etc...Les dimensions horizontales de la particule aérologique sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres, les dimensions verticales de l'ordre de 30 Km et l'échelle de temps est de l'ordre de la seconde.

Echelle Horizontale	Echelle de temps	Prédominance des mouvements horizontaux	Phénomènes intéressés
Petite < 1Km	Quelques secondes à quelques minutes	Modérée	Turbulence. Convection dans Cumulus. Ondes de reliefs.
Moyenne(sous-synoptique)	Quelques minutes à quelques heures	Très nette	Brises thermiques. Convection orageuse. Mvts orographiques.
Grande(synoptique 100 Km)	Quelques heures à 1 jours	Forte	Systèmes Cycloniques. Fronts. Courants jets.
Grande (planétaire) 1000 Km	Quelques jours à 1 mois	Très forte	Circulation générale et marées atmosphériques

Table 1.2 : Classification des mouvements atmosphériques en fonction de l'échelle utilisée.

La table 1.2 propose une classification des mouvements atmosphériques en fonction de l'échelle utilisée et rejoint donc ce que nous avons dit précédemment. On remarque que l'échelle de temps croît avec l'échelle horizontale et que plus l'échelle est petite, plus la vitesse verticale prend de l'importance puisque elle devient comparable ou même supérieure à la vitesse horizontale. On peut ainsi avoir des vitesses verticales de l'ordre de 10 m/s dans un cumulonimbus, 10 cm/s dans un système frontal cyclonique et 1 cm/s dans la circulation générale en raison même de son concept statistique.

3.1.2. Stations continentales

Les stations continentales servent à collecter les paramètres météorologiques à l'échelle synoptique. Elles peuvent être automatisées (stations à télémessure) ou bien abriter des techniciens chargés d'effectuer les relevés météorologiques. Toutes les observations sont faites aux heures synoptiques (toutes les trois heures à partir de 0 h UTC) et sont ensuite transmises sous formes de codes chiffrés (SYNOP) à des centres chargés de centraliser les données pour ensuite les analyser. En provenance du monde entier, ces données sont reportées

sur des cartes, soit manuellement, soit par ordinateur en utilisant un symbolisme approprié.

Ces cartes sont ensuite analysées et donnent une vue synoptique (à grande échelle) de la situation météorologique. Beaucoup de paramètres peuvent être relevés dans une station continentale :

- direction et vitesse du vent, pression atmosphérique et tendance (c'est à dire la forme et la valeur de sa variation depuis l'observation précédente), température, humidité, portées entre 0 et 1500m.
- si la station abrite des techniciens, ceux-ci peuvent aussi donner une estimation de la visibilité horizontale, de la hauteur de l'étendue des couches nuageuses situées à n'importe quel niveau, et décrire le temps présent (pluie, neige, grêle, orage, etc.).
- d'autres données peuvent aussi être recueillies et transmises au cours d'une journée d'observation : température minimale et maximale, hauteur d'eau recueillie après une précipitation, diamètre des grêlons, température au niveau du sol, durée d'insolation. Les stations météorologiques sont alors plus ou moins spécialisées dans un certain type d'activité : Météorologiques aéronautiques, météorologie agricole, centre d'étude de la neige, etc.

3.1.3. Stations maritimes

Une station maritime effectue à peu près le même travail qu'une station continentale. Comme elle est installée sur un navire de la marine marchande, elle peut fournir des renseignements concernant l'état de la mer : température de l'eau, direction et hauteur de la houle, etc. Les données sont transmises grâce à un code, le **SYNOP SHIP**, qui ressemble beaucoup au code **SYNOP**. Bien entendu, la position du navire doit être transmise car sans elle, les données ne présentent pas un grand intérêt. Ce sont les marins spécialement formés qui effectuent les relevés des paramètres météorologiques. Il existe aussi des bouées automatiques qui dérivent très lentement et qui effectuent des relevés météorologiques. Leur position est repérée par des satellites et seuls certains paramètres sont mesurés.

3.2. Stations météorologiques de radiosondage

Ces stations effectuent la collecte des paramètres météorologiques à l'échelle aérologique. Elles permettent d'accéder aux couches de l'atmosphère comprise entre 0 et 30 Km approximativement (fonction de l'altitude à laquelle éclate le ballon) et donnent la connaissance thermodynamique de la particule en altitude (pression, température et humidité) ainsi que la connaissance de son mouvement (vent en altitude).

Le principe est simple : un ballon généralement gonflé à l'hydrogène, emporte une sonde capable de mesurer la pression, la température et l'humidité, un émetteur radio capable de transmettre les mesures, et un réflecteur radar qui permet à un radar de suivre la trajectoire du ballon au cours de son ascension. Lorsque le ballon éclate, l'ensemble redescend en étant freiné par un petit parachute mais le matériel n'est généralement pas récupéré. Il faut aussi que la station soit équipée d'une baie de réception des télémesures ainsi que d'un radar. Des mesures de vent sont aussi effectuées et ne nécessitent pas d'ensemble de télémesure puisqu'il suffit de suivre la trajectoire du ballon grâce au réflecteur radar.

Des navires météorologiques, effectuaient aussi des radiosondages de l'atmosphère mais ils ont été abandonnés au profit d'un système moins coûteux appelé SARE (système automatique de radiosondage embarqué), embarqué sur des navires marchands. Il s'agit d'un conteneur muni d'une baie de réception des télémesures entièrement automatisée et capable de prendre en charge toutes les opérations (réception, dépouillement, envoi de message). Le ballon n'est plus suivi par un radar mais la position de la radiosonde est tout de même connue grâce à un moyen moderne de navigation de type Oméga qui utilise des signaux radioélectriques émis par plusieurs stations au sol pour déterminer une position. Celle-ci est ensuite transmise, en même temps que les données, à un satellite qui effectue le relais vers les stations de réception au sol. Ce système ne requiert plus que la présence d'un seul technicien de météorologie, chargé de gonfler le ballon et le lâcher et également chargé de surveiller la bonne marche des opérations. D'un jour à l'autre, le radiosondage n'est pas effectué au même endroit du fait que le bateau avance mais cela ne présente aucun inconvénient.

3.3. Autres moyens d'exploration de l'atmosphère

3.3.1. Le radar

Il peut servir à suivre la trajectoire de cibles qui peuvent être soit un réflecteur comme c'est le cas pour le radiosondage, soit des particules métalliques qu'on a disséminées dans l'atmosphère et dont on veut étudier la dispersion. Ce type de relevé permet d'obtenir des renseignements sur le vent en altitude. Le radar peut aussi servir à localiser les zones précipitantes (fronts, cellules orageuses, averses) et à suivre leur déplacement

3.3.2. Les satellites

Depuis 1960, les satellites météorologiques apportent une vision globale et planétaire de l'état de l'atmosphère. En effet, le satellite météorologique permet de nombreuses mesures :

température au sol ou en altitude, Température à la surface des océans ou au sommet des nuages, vitesse du vent, degré d'humidité. On distingue deux familles de satellites météorologiques, ayant chacune des objectifs assez différents mais complémentaires. Ce sont : les satellites polaires (héliosynchrones) et les satellites géostationnaires (géosynchrones).

3.3.2.1. Satellites polaires

Ils sont parfois appelés satellites à défilement. Ce sont des satellites à orbite basse (entre 400 et 1500 Km d'altitude), survolant pratiquement les pôles terrestres. La plupart de ces satellites se déplacent sur une orbite pour laquelle l'heure locale est pratiquement constante. Leur orbite est elliptique et le plan de l'orbite est fixe par rapport aux étoiles mais variable par rapport à la terre qui effectue son mouvement de rotation. Les satellites à orbite polaire font le tour de la terre en 110 mn environ . Le plan de leur orbite se déplace d'Est en Ouest comme le soleil. (figure 1.3)

Ces satellites présentent plusieurs avantages intéressants :

- Ils couvrent en 24 h la totalité de la surface terrestre.
- Ils surveillent les mêmes régions chaque jour aux mêmes heures.
- Ils enregistrent, à chaque rotation, une image de chaque pôle, fournissant ainsi des données intéressantes pour les études de bilan radiatif.

Mais l'inconvénient majeur demeure dans le fait que chaque région, à l'exception des deux pôles, n'est survolée que deux fois par jour, ce qui laisse peu de marge pour suivre l'évolution d'un phénomène.



Fig. 1.3 : Illustration du mouvement d'un satellite polaire.

3.3.2.2. Satellites géostationnaires

Comme leur nom l'indique, ces satellites sont fixes par rapport à la surface terrestre. Ils se déplacent à une altitude de 36000 Km au-dessus de l'équateur, en parcourant leur orbite en 24 heures (vitesse de rotation de la planète). Ils restent donc pratiquement stationnaires au-

dessus d'un point de l'équateur. Depuis cette position avantageuse, ils peuvent obtenir de fréquentes images et d'autres données pour un quart de la surface terrestre.

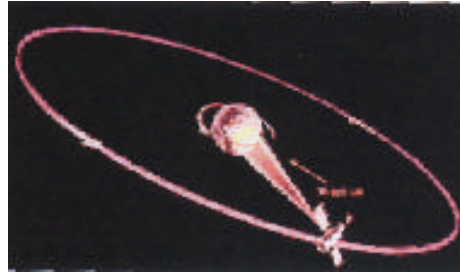


Fig. 1.4 : illustration du mouvement d'un satellite géostationnaire

Parmi les inconvénients de ces satellites, on peut citer :

- les pôles ne sont pas accessibles.
- les régions à hautes altitudes sont observées sous un angle rasant ce qui déforme nettement la perspective.
- De par sa très haute altitude (36000 Km), il faut dépenser une grande énergie (carburant) pour mettre le satellite sur orbite.
- Deux fois par an, aux moments des équinoxes, le soleil se trouve dans le plan équatorial de la terre et on assiste à un alignement Soleil-Terre-Satellite qui fait que ce dernier se trouve dans le cône d'ombre de la terre et subit une éclipse : Par exemple, aux environ de 00 h TU (temps universel), le satellite météorologique géostationnaire Météosat, qui est positionné à 0° de longitude, se trouve dans le cône d'ombre de la terre. Durant la période de l'éclipse, on est privé de certaines images et la seule solution pour pallier à cet inconvénient est que le satellite dispose de batteries. Cette solution n'est pas toujours retenue car elle entraîne d'autres problèmes (alourdissement de la charge à mettre en orbite, problème de l'usure des batteries par les cycles de charges et décharges, fonctionnement délicat,etc...)

3.3.3. Le lidar

Il est constitué d'un laser qui émet dans l'atmosphère un pinceau de lumière ou d'infrarouge, et d'un télescope muni d'un détecteur plus ou moins sophistiqué. Les particules en suspension dans l'air rétro-diffusent l'énergie lumineuse. L'analyse du signal et de son étalement dans le temps permet d'accéder au profil de propriété mesurée le long de la direction visée. Dans les lidars les moins perfectionnées, on mesure simplement l'intensité

rétro-diffusée et on obtient ainsi la hauteur et la distribution des nuages en altitude. Dans les lidars Doppler, on mesure en plus le décalage en fréquence dû à l'effet Doppler, afin de remonter à la vitesse des particules atmosphériques et mesurer les vents. Il existe aussi des lidars à absorption différentielle qui émettent sur deux fréquences et qui permettent des études de concentration de constituants atmosphériques.

3.3.4 Ballons sondes

Le ballon-sonde mesure et transmet en continu les valeurs de la température, l'humidité et la pression à l'aide d'une radio-sonde fixée à un ballon gonflable, en même temps qu'il rend compte de sa position. Le ballon est rempli d'un gaz léger, souvent de l'hélium. Au fur et à mesure qu'il s'élève, le gaz se dilate. Quelquefois, le ballon explose, mais un parachute rapporte les instruments sur terre.

Ces ballons sont utilisés dans le cadre d'une campagne de mesures plutôt que pour la collecte journalière des paramètres atmosphériques devant servir à l'analyse et la prévision. Mis en œuvre par de grands laboratoires de recherche, ils permettent d'explorer la haute stratosphère (30 à 50 Km) et emportent tout un lot de capteurs et d'expériences scientifiques, dont le dépouillement fera progresser les connaissances de la couche atmosphérique qui sert d'interface avec le milieu interplanétaire.

3.3.5 Fusées météorologiques

Elles permettent d'explorer les hautes couches de l'atmosphère situé entre 50 et 100 km. Les mesures peuvent être réalisées par capteurs et transmises par radio, mais les fusées peuvent aussi servir à ensemercer l'atmosphère avec des particules métalliques suivies du sol par radar. Elles peuvent aussi servir à larguer une sonde parachutée qui effectue ses mesures durant la phase de descente, l'altitude de cette sonde étant alors déterminé par radar. Vu le coût très élevé de ces fusées, celles-ci ne sont utilisées que de façon ponctuelle lors de campagnes de mesures souvent réalisées que de façon ponctuelle lors de campagnes de mesures souvent réalisées en collaborations avec d'autres pays.

3.3.6 Relevés effectués par avion

Plusieurs pays disposent d'avions qui sont équipés en véritables laboratoires volants qui peuvent servir à des campagnes de recherche sur des phénomènes bien précis. Les Etats-Unis se servent d'avions dont la structure a été renforcée pour étudier in situ la structure des cyclones tropicaux. Il suffit de monter sur un avion léger des capteurs donnant température et

point de rosée pour pouvoir effectuer un petit sondage de l'atmosphère. Ce sondage est analogue à un radiosondage, donnant des informations intéressantes de l'état aérologique de l'atmosphère dans la tranche 0 à 3000 m. C'est généralement ce principe qui est adopté pour l'assistance météorologique des concours de vol à voile car il a le mérite d'être simple à mettre en œuvre et relativement bon marché. Bien entendu, la majeure partie des relevés météorologiques provenant d'avions en vol est due aux avions de ligne qui peuvent fournir, par l'intermédiaire de leurs centrales à inerties (ou système équivalent) le vent en altitude. Un simple thermomètre fournit la température au niveau de vol à condition de corriger la mesure de l'effet d'échauffement cinétique. Ces données sont alors transmises aux centres météorologiques sous forme d'un message appelé AIREP (Air Report). Ces avions peuvent aussi signaler la présence de tous phénomènes contraignants pour l'aéronautique (turbulence, givrage, nuages volcaniques, etc...). Parfois, les données sont transmises automatiquement à l'exploitant par le biais d'une liaison ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System ou encore Système de communications codées Air-Sol).

Les équipages ont également la possibilité d'adresser aux services de la météorologie, via leurs opérations aériennes, des comptes rendus sur les phénomènes météorologiques rencontrés en vol (messages PIREP : Pilot Report).

3.3.7. Cerf-volants

Le cerf-volant est certainement l'un des plus anciens procédés d'exploration de l'atmosphère et aussi le plus économique. Les instruments sont embarqués dans une nacelle fixée sous cerf-volant et sont récupérés une fois les mesures faites. Ils peuvent aussi transmettre leurs données grâce à un émetteur VHF. L'exploration est limitée à quelques centaines de mètres suivant l'importance du vent et l'altitude du cerf-volant peut être facilement obtenue en fonction de la longueur de la ligne de retenue et de la hauteur angulaire au-dessus de l'horizon.

3.4. Collecte et transmission des données

L'organisation de la météorologie internationale repose sur le relevé et la collecte des mesures au même moment partout dans le monde et dans les mêmes conditions. Dans les stations de base, les mesures courantes (température, pression, humidité, etc.) sont effectuées toutes les 6 heures (0 h, 6 h, 12 h, 18 h) en temps universel (heure du méridien de Greenwich). Ces observations locales, rédigées en langage chiffré, selon un code

international unique, sont transmises immédiatement à des stations régionales puis nationales; ces dernières procèdent aux premiers traitements, en s'appuyant aussi sur les données provenant des satellites et des pays étrangers voisins. Certains de ces centres regroupent et diffusent les données à l'échelle continentale (par exemple Nairobi pour l'Afrique) avant de les transmettre aux centres mondiaux des traitements que sont Washington et Bracknell près de Londres. L'objectif est d'obtenir un instantané de l'état de l'atmosphère afin de prévoir les mouvements des masses d'air. En 1 heure, approximativement, les données de surface et d'altitude de l'ensemble de l'hémisphère Nord sont traitées et les résultats diffusés auprès des centres régionaux de nombreux pays. En 2 heures, les cartes météorologiques des centres nationaux, dessinées à partir des données recueillies, sont transmises par télécopie et disponibles dans les bureaux de météorologie des aéroports et des grandes villes. Certaines analyses des conditions en altitude sont aujourd'hui préparées automatiquement par des ordinateurs, qui, grâce à des périphériques supplémentaires, peuvent traduire et stocker des informations de télétype codées, faire des calculs mathématiques, et cartographier les résultats. Ces analyses sont transmises par télécopie aux différents centres et utilisées dans des procédures météorologiques numériques.

On connaît depuis longtemps l'ensemble des équations qui régissent les conditions physiques de l'atmosphère. Mais il a fallu attendre ces dernières années pour que des équipements informatiques rapides et suffisamment puissants permettent leur exploitation. Par exemple le centre Suitland, aux États-Unis, exploite sur ses ordinateurs, 2 fois par jour, 4 types de modèles météorologiques, 2 pour couvrir le monde, et 2 autres pour couvrir l'Amérique du Nord. On utilise des types de modèles différents pour des problèmes météorologiques spécifiques comme les ouragans. À l'échelon mondial, le centre de données météorologiques le plus important est le Centre européen de prévision météorologique, situé à Bracknell, en Angleterre. Cependant, la complexité des phénomènes atmosphériques et l'inégalité de la densité du réseau de mesures à travers le monde ne permettent pas d'établir une prévision directe. Il est possible à l'heure actuelle de faire des statistiques mathématiques analogues ou de reproduire des modèles de l'atmosphère. Grâce à ces équations, on peut calculer les variations des propriétés atmosphériques sur une période de temps brève, à condition de connaître l'état initial de l'atmosphère avant d'effectuer les calculs. En résolvant les équations, il est possible d'informatiser l'état de l'atmosphère

10 minutes après les observations. Les données prévues sont alors substituées aux données initiales observées et ce processus est répété pour chaque période de temps jusqu'à 72 heures.

Ces procédures sont donc transmises automatiquement, mais les prévisions qui en résultent nécessitent une certaine expérience pour les interpréter et les adapter aux conditions locales qui ne sont pas prises en compte dans les modèles.

La précision des prévisions météorologiques est relative. Ces dernières années, on a eu tendance à donner des précisions de l'ordre de 80 à 85% pour des prévisions sur 24 heures. Les modèles numériques permettent un affinement considérable de la précision des prévisions, comparée à celle obtenue par les anciennes méthodes trop subjectives. Aujourd'hui, on arrive à prévoir le temps 5 jours à l'avance avec un certain succès.

De nos jours, le radar est devenu un instrument courant, essentiel et incontournable pour la mesure et l'observation météorologique. D'ailleurs, la radarmétéorologie apparaît aujourd'hui comme une discipline scientifique à part entière qui contribue énormément à la connaissance de l'atmosphère.

Au chapitre II, nous allons rappeler le principe de fonctionnement du radar, donner sa configuration électronique et établir l'équation radar.

CHAPITRE II : LE RADAR

1. Présentation

Mis au point à l'origine comme instrument de guerre, le radar est aujourd'hui utilisé dans beaucoup de domaines, comme par exemple la navigation, le contrôle du trafic aérien, la météorologie et la radioastronomie. Le terme *radar* est un nom de code adopté au cours de la Seconde Guerre mondiale par l'US Navy, signifiant «*radio detection and ranging*» (système de détection et de télémétrie par ondes radio). Les appareils de ce type n'indiquent pas seulement la présence et la distance d'un objet éloigné, la «cible», mais déterminent également sa position dans l'espace, sa taille, sa forme ainsi que sa vitesse et sa direction.

De ce fait, il existe différents types de radars selon l'application que l'on voudrait faire. Ils peuvent être classés en deux grandes catégories : les radars à ondes entretenues ou radars CW (Continuous Waves) et les radars à impulsion [Cole, 1990 ; Sauvageot, 1982]. Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons aux radars pulsés utilisés pour l'observation météorologique.

2. Principe de fonctionnement d'un Radar pulsé

Pour fonctionner correctement, l'émetteur radar doit émettre une grande quantité d'énergie (ondes électromagnétiques), puis recevoir, détecter et mesurer une fraction infime de celle-ci de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-14} W, soit dans un rapport de 10^{-17} à 10^{-20} de la puissance émise, retournée sous forme d'écho.

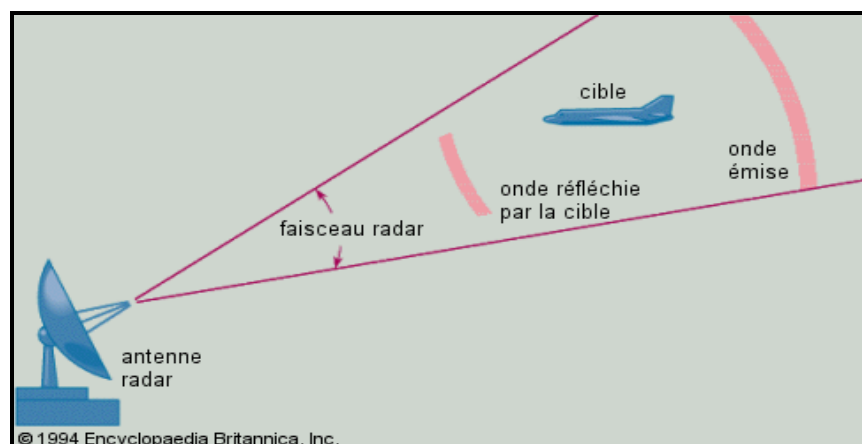


Fig. 2.1 : Principe de fonctionnement d'un radar

Comment détecter ce minuscule écho en présence du signal émis, extrêmement puissant? La solution, apparue vers 1938, est celle du radar à impulsions (par opposition au radar à ondes continues) : une impulsion est émise par une antenne directive pendant 0,1 à 5 microsecondes ; puis, l'émetteur reste silencieux pendant quelques millisecondes. La même antenne est utilisée par le récepteur grâce à un dispositif de commutation appelé duplexeur (voir figure 2.2).

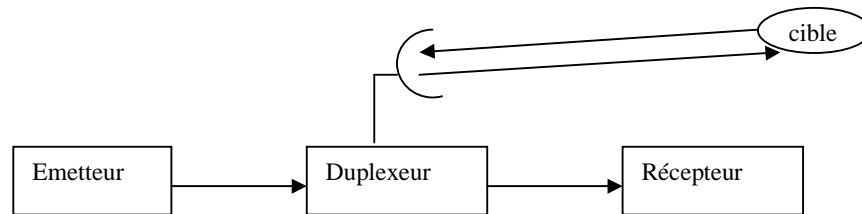


Fig. 2.2 : Principe du radar pulsé

Ainsi, la distance (r) qui sépare la cible de l'antenne radar, s'obtient en mesurant le temps (Δt) qui sépare l'impulsion d'émission de son écho à la réception. On suppose que les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide. On peut alors écrire :

$$r = c \Delta t / 2 \quad (2-1)$$

Cependant les antennes radar doivent avoir une directivité élevée pour envoyer un faisceau étroit. Étant donné que la largeur du faisceau est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement, et inversement proportionnelle au diamètre de l'antenne, on mit au point, à la fin des années 1930, le radar fonctionnant sur ondes centimétriques.

Les avantages du radar à ondes centimétriques sont, d'une part, sa faible sensibilité aux mesures défensives de l'ennemi (brouillage), et d'autre part, une haute résolution.

Le récepteur doit amplifier et mesurer un signal extrêmement faible à une fréquence extrêmement haute.

Les radars sont aujourd'hui fort répandus et tout à fait irremplaçables quand il est nécessaire de détecter, de localiser ou de guider. L'opérateur peut alors déceler l'objet et en déterminer certaines caractéristiques: il est possible d'en définir la nature, la vitesse, la

position en étudiant son écho sur l'écran, c'est-à-dire la nature du signal réfléchi.

Pour le radar météorologique, la cible est essentiellement constituée par l'atmosphère elle-même, et plus précisément, par les particules de nuages et de précipitations. La cible est la région diffusante dont les dimensions sont généralement importantes par rapport à celle du faisceau d'ondes électromagnétiques issues de l'antenne radar. L'observation à toutes les distances dans la direction de visée, combinée aux mouvements de l'antenne permet d'en faire une exploration en volume. Il existe deux sortes de radar à impulsion : le radar cohérent et le radar non cohérent.

2.1 Radar non cohérent

Le schéma bloc du radar non cohérent est donné par la figure 2.3. Ce radar travaille généralement à des fréquences qui sont comprises entre 3 et 35 GHz. L'oscillateur est un tube à ondes progressives ou un magnétron, modulé en tout ou rien à l'aide d'un oscillateur AM. Ce dernier détermine donc la fréquence de répétition des impulsions f_r (ou PRF : pulse Repetition Frequency) ainsi que leur durée τ . L'impulsion émise est alors composée d'un train périodique d'ondes à très hautes fréquences, soient quelques milliers d'oscillations de fréquence f_0 répétées tous les temps $T_r = 1/f_r$. En pratique, la durée τ est comprise entre quelques dixièmes de μs à quelques μs et la période de répétition T_r est d'environ 1ms à quelques dizaines de ms. La puissance crête fournie par le radar à l'émission, est de quelques dizaines à quelques centaines de KW. Un duplexeur permet d'utiliser alternativement la même antenne à l'émission et la réception. En outre, le duplexeur est conçu de façon à protéger le récepteur durant l'émission. Considérons une cible ponctuelle située dans le faisceau d'ondes émises par le radar. Après rétrodiffusion par la cible, le radar reçoit un signal de la forme : $e(t) = E_0 \cdot \cos[\omega_0 + \Phi(t)]$.

Ce signal est d'abord transmis à un amplificateur à faible bruit, puis, à un changeur de fréquences formé d'un mélangeur et d'un oscillateur local de fréquence f_L . Après changement de fréquence, on obtient un signal de fréquence intermédiaire égale à $f_I = |f_0 - f_L|$.

Pour un radar non cohérent, la fréquence intermédiaire f_I se situe entre 30 et 60 MHz. L'intérêt d'utiliser une fréquence intermédiaire réside dans le fait que le signal radar est transmis à plus basse fréquence et ceci dans le but d'employer des circuits électroniques ordinaires. A la sortie de l'étage d'amplification FI, se trouve un démodulateur AM, qui

permet de détecter l'écho radar. Le signal ainsi démodulé, est transmis à l'amplificateur vidéo fréquence, puis au système d'acquisition, de traitement et de visualisation du signal radar.

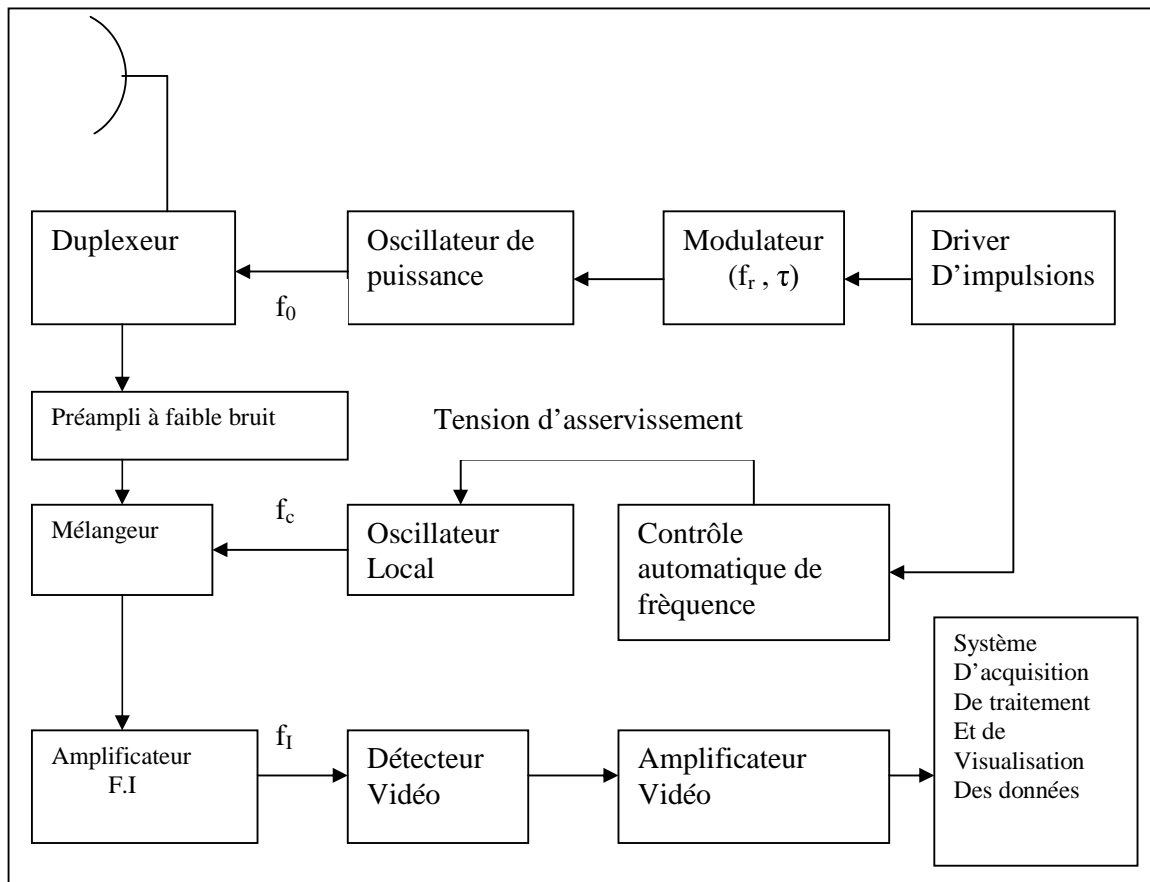


Fig. 2.3 : Schéma- bloc d'un radar non cohérent à impulsion

2.2 Radar cohérent

Soit une cible ponctuelle se trouvant à une distance r , et se déplaçant à une vitesse radiale v_r . Après rétrodiffusion par la cible, la phase du signal reçu par l'antenne radar est :

$$\Phi_r(t) = -\frac{4\pi \cdot r(t)}{\lambda} \quad (2-2)$$

Où λ est la longueur d'onde à laquelle travaille le radar.

La variation de phase qui en résulte, vaut :

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{dr}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot v_r \quad (2-3)$$

On a donc affaire à un effet Doppler de fréquence :

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt} = -2 \cdot \frac{v_r}{\lambda} \quad (2-4)$$

La fréquence Doppler f_d est négative lorsque la cible s'éloigne du radar, c'est à dire lorsque $v_r > 0$ et elle est positive dans le cas contraire.

Outre les mesures de distance, de position et d'intensité des échos radar, le radar cohérent permet de détecter l'effet Doppler lié au déplacement d'une cible et de déterminer la vitesse radiale de celle-ci. Comme le montre le schéma de la figure 2.4, il est donc de configuration plus complexe que le radar non cohérent. Ainsi, son récepteur est conçu de façon qu'on puisse connaître à sa sortie, à la fois l'amplitude et la phase du signal rétrodiffusé.

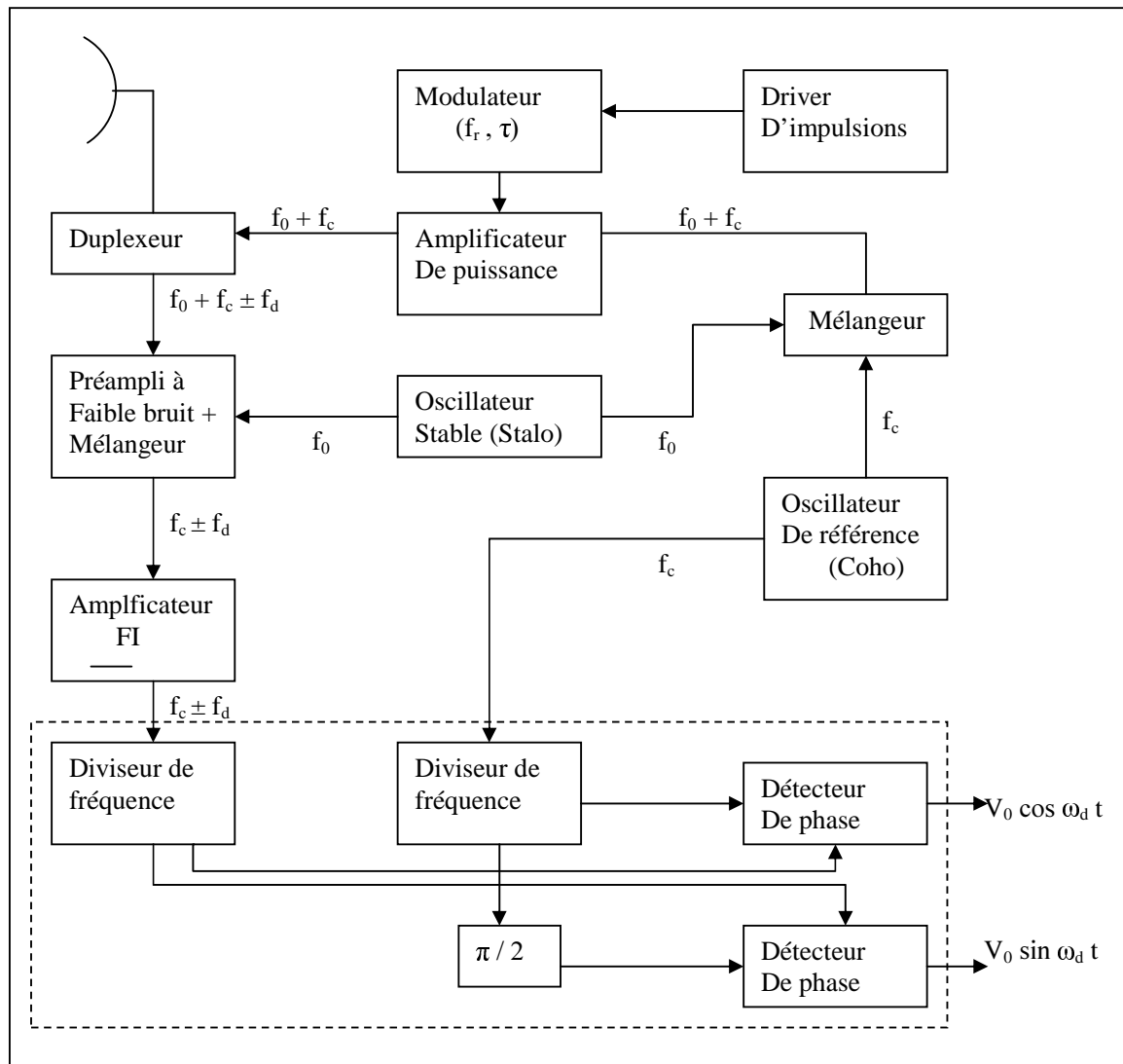


Fig. 2.4 : Schéma- bloc d'un radar cohérent à impulsion

Pour cela, un oscillateur local très stable, appelé stalo (stable oscillator), et travaillant à très hautes fréquences, fournit un signal de fréquence f_0 . Ce dernier est mélangé avec un signal également très stable, provenant d'un oscillateur cohérent, appelé coho (coherent oscillator). Cet oscillateur étant pris comme référence, la fréquence du signal délivré par celui-ci est égale à la fréquence intermédiaire f_c . Le signal résultant est de fréquence $f_0 + f_c$. Après amplification par un tube de type klystron, il détermine alors les caractéristiques de l'onde émise.

Ensuite, à la réception, le signal capté par l'antenne du radar, est mélangé avec le signal du stalo pour produire un signal de fréquence intermédiaire (FI) dont la phase est celle du signal rétrodiffusé. La phase du signal produit par le coho est celle du signal à l'émission. Aussi, celui-ci est comparé au signal FI au niveau de deux modulateurs équilibrés jouant le rôle de détecteurs de phase. Notons qu'au préalable, les deux signaux ont subi une division de fréquence et sur l'une des deux voies, la phase du signal issue du coho, a été avancée de $\pi / 2$ avant comparaison. Les signaux obtenus respectivement aux deux sorties du récepteur sont alors de la forme : $v_1(t) = V_0 \cos(2\pi f_d t)$ et $v_2(t) = V_0 \sin(2\pi f_d t)$.

On en déduit l'amplitude du signal rétro-diffusé à partir de l'expression $V_0 = [v_1^2 + v_2^2]^{1/2}$ et la phase contenant la fréquence Doppler en écrivant que : $\Phi(t) = \text{Arc tg}(v_2 / v_1)$. En pratique, la mesure de l'amplitude et celle de la phase du signal rétro-diffusé peut se faire à l'oscilloscope en utilisant la méthode de Lissajou ou tout autre technique de mesure de ces deux paramètres

3. Caractéristiques du radar

3.1 La résolution

La résolution d'un radar est son aptitude à séparer deux cibles ponctuelles qui sont proches l'une de l'autre [Sauvageot, 1982; Darricau, 1981]. On distingue la résolution en volume, la résolution radiale relative à des cibles situées dans la même direction de visées mais à des distances différentes et la résolution transversale relative à des cibles situées à la même distance du radar, mais dans des directions différentes. Elles sont liées respectivement à la longueur de l'impulsion et à la largeur du faisceau

3.1.1 La résolution radiale

Soit l'impulsion radar représentée par la figure 2.5

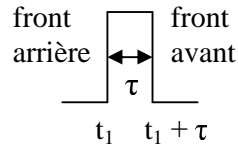


Fig. 2.5 : Impulsion radar

Soit une cible située à une distance r_1 du radar, interceptée par le front arrière de l'impulsion ; l'écho de celle-ci arrive au radar après réflexion à l'instant $t_1 + \frac{2.r_1}{c}$.

Considérons une autre cible située à une distance r_2 , et interceptée cette fois par le front avant de l'impulsion ; l'écho de celle-ci arrive à l'instant $t_1 + \tau + \frac{2.r_2}{c}$.

Si ces deux échos parviennent au récepteur au même temps, ce dernier ne les distingue pas si : $t_1 + \frac{2.r_1}{c} = t_1 + \tau + \frac{2.r_2}{c}$. La durée de l'impulsion vaut : $\tau = \frac{2.(r_1 - r_2)}{c}$.

Posons $h / 2 = (r_1 - r_2)$, la distance qui sépare les deux cibles. La résolution radiale est définie par :

$$h / 2 = c \tau / 2 \quad (2-5)$$

La résolution radiale est indépendante de la distance de la cible. Elle détermine l'extension radiale de la région contribuant à l'écho reçu à un instant donné. $h/2$ représente aussi la profondeur du volume de résolution de l'impulsion.

3.1.2 Résolution transversale

Dans le sens transversal, le radar ne détecte pas les diffuseurs situés en dehors de la zone illuminée par le lobe principal. De ce fait, la résolution transversale sera déterminée par l'ouverture du lobe principal à 3dB. En raison de la non symétrie de révolution, cette ouverture prend une forme elliptique :

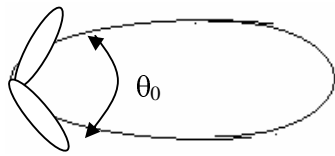


Fig. 2.6 : Ouverture à 3dB en site ' θ_0 '

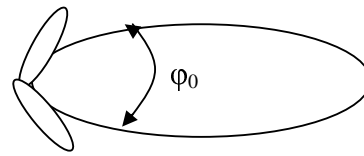


Fig. 2.7 : Ouverture à 3dB en azimute ' φ_0 '

La résolution transversale correspond à la surface illuminée par le lobe principal :

$$s = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{4} \quad (2-6)$$

3.1.3 Volume de résolution de l'impulsion

Le volume de résolution (V) de l'impulsion radar est exprimé par le produit de la résolution radial par la résolution transversale. Il représente le volume d'où proviennent les signaux reçus par le radar à un même instant et dont la somme définit l'intensité instantanée du signal. Soit :

$$V = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0 \cdot c \cdot \tau}{4 \cdot 2} \quad (2-7)$$

Où θ_0 et φ_0 sont exprimés en radians

3.2 Ambiguïtés du radar

3.2.1 Ambiguïté en distance et zone aveugle

Considérons le train d'impulsions émis par le radar (voir figure 2.8):

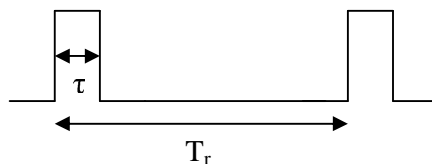


Fig. 2.8 : Train d'impulsions émis par le radar

Le radar détecte correctement les cibles situées aux distances comprises entre $\frac{c \cdot \tau}{2}$ et

$\frac{c.T_r}{2}$. Par ailleurs, lorsque les échos proviennent d'une distance (r) supérieure à une ou plusieurs fois $\frac{c.T_r}{2}$, il y a une ambiguïté dans la détermination de la distance à laquelle se trouvent ces échos [Sauvageot, 1982; Darricau, 1981]. Par suite, la distance maximale d'observation non ambiguë est $d_{\max} = \frac{c.T_r}{2}$. Au-delà de cette distance, le radar indique un temps d'aller – retour qui correspond à une distance $r - n*d_{\max}$ (avec $n=1; 2; \dots$), et on détecte une fausse distance de la cible. D'autres part, au deçà de la distance $d_{\min} = \frac{c.\tau}{2}$, le radar n'a pas encore commuté en mode réception. On dit qu'il est aveugle. De ce fait la portée du radar est délimitée par d_{\min} et d_{\max} .

3.2.2 Ambiguïté en vitesse

Dans le cas d'une cible en mouvement, la vitesse est mesurée en déterminant la distance séparant deux impulsions successives. Mais, si le déphasage associé à cette vitesse devient supérieur à 180° , il se produit un repliement du spectre Doppler. Il en résulte alors une ambiguïté sur la phase et par conséquent, sur la vitesse. Pour expliquer comment se produit l'ambiguïté sur la vitesse, considérons la figure 2.9 qui est un schéma simplifié d'un radar détectant une cible en mouvement.

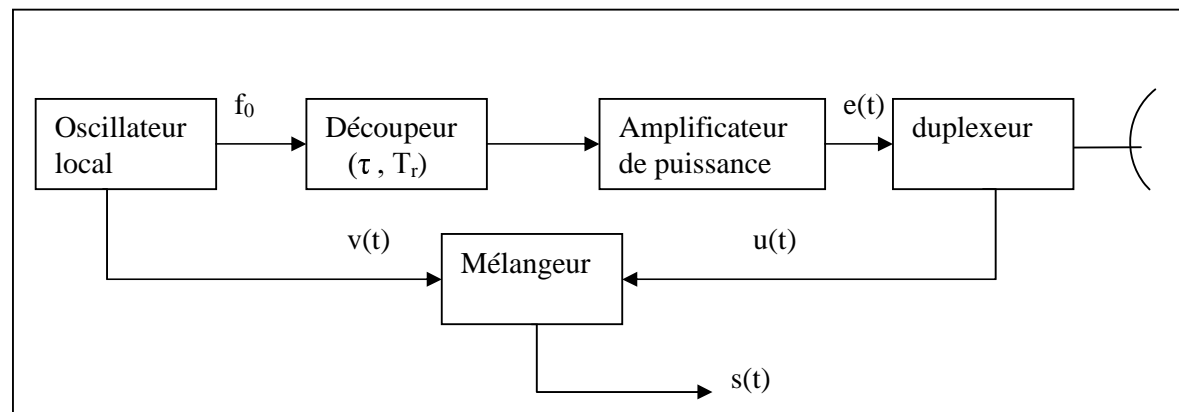


Fig. 2.9 : Schéma simplifié d'un radar détectant une cible en mouvement.

Le signal émis est un signal sinusoïdal de fréquence f_0 , issu de l'oscillateur local et découpé en impulsions de durée τ et d'espacement T_r . Le premier signal émis s'écrit :

$$e_1(t) = e_0 \cos 2\pi f_0 t.$$

Après son aller et retour dans l'atmosphère et réflexion sur la cible, ce même signal est reçu par le radar à l'instant t_1 . Comme la cible est en mouvement, la fréquence de ce signal subit un décalage Doppler f_d . Donc, son expression est : $u_1(t) = u_0 \cos 2\pi (f_0 + f_d) t$. La phase du signal émis ne varie pas pendant son temps de parcours, tandis que celle de l'oscillateur local et transmis au mélangeur, vaut donc : $v_1(t) = v_0 \cos 2\pi f_0 (t + t_1)$. Après changement de fréquence et élimination des fréquences élevées, le signal est : $s_1(t) = s_0 \cos (2\pi f_d t - 2\pi f_0 t_1)$.

A l'instant T_r , un second signal est émis. Il s'écrit : $e_2(t) = e_0 \cos 2\pi f_0 (t + T_r)$ et le signal rétrodiffusé par la cible sera reçu à l'instant $T_r + t_2$. Ce signal est donc égal à :

$u_2(t) = u_0 \cos [2\pi (f_0 + f_d) t + 2\pi f_0 T_r]$ et le signal à la sortie de l'oscillateur local vaut :

$v_2(t) = v_0 \cos 2\pi f_0 (t + T_r + t_2)$.

Après battement et filtrage, on obtient : $s_2(t) = s_0 \cos (2\pi f_d t - 2\pi f_0 t_2)$.

Au bout de k impulsions, on obtient un signal de sortie qui s'écrit :

$$S_k(t) = s_0 \cos (2\pi f_d t - 2\pi f_0 t_k) \quad (2-8)$$

Soit r_0 , la distance à laquelle se trouvait la cible à l'instant initial et soit v_r , sa vitesse radiale. Jusqu'à l'instant t_k , la cible a parcouru une distance égale à :

$$r_k - r_0 = k v_r T_r \quad (2-9)$$

On en déduit que le laps de temps t_k vaut : $t_k = 2 r_k / c = 2 r_0 / c + 2 k v_r T_r / c$. Par ailleurs, on peut négliger la variation de phase due à l'effet Doppler pendant la durée de l'impulsion, car $2\pi f_d \tau \ll 1$. En utilisant l'expression (2-4) de la fréquence Doppler et l'expression (2-8) du signal de sortie, puis en posant $\Phi_0 = -4\pi f_0 r_0 / c$, on obtient :

$$s_k(t) = s_0 \cos [2\pi k f_d T_r + \Phi_0]$$

Un signal issu d'une cible fixe est donc à phase constante, tandis que la phase d'une cible mobile varie, d'une impulsion à l'autre, d'une quantité $\Delta\Phi = 2\pi f_d T_r$.

- si $f_d = 0$, on obtiendra : $s_k(t) = s_0 \cos \Phi_0$ (échos fixe)

- si $f_d < 1/2T_r$, on aura : $\Delta\Phi < \pi$ et $s_k(t) = s_0 \cos [k \Delta\Phi + \Phi_0]$

- si $f_d = 1/2T_r$, on obtiendra : $s_k(t) = s_0 \cos [\Phi_0 + k \pi]$

- si $f_d > 1/2T_r$, on aura : $\Delta\Phi > \pi$ et $s_k(t) = s_0 \cos [k \Delta\Phi + \Phi_0]$

-si $f_d = 1/T_r$, on obtiendra : $s_k(t) = s_0 \cos [\Phi_0 + 2 k \pi] = s_0 \cos \Phi_0$

Il en résulte que pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté dans la mesure de la vitesse, il faudrait qu'on ait $f_d \leq f_r / 2$ (avec $f_r = 1/T_r$).

3.3 Visualisation des données

La visualisation du signal radar peut se faire selon trois modes qui sont :

PPI (Plan Position Indicator) : celle-ci est une représentation de la forme et de la position de la cible en azimut, à site constant, dans le système de coordonnées polaires.

RHI (Range Height Indicator) : c'est une représentation de la forme et de la position de la cible en site, dans le système de coordonnées polaires.

HTI (Height Time Indicator) : c'est une représentation de l'intensité du signal émis et de son échos en fonction du temps.

4. Equation radar

L'équation radar exprime la relation entre l'intensité moyenne du signal reçu et les propriétés du volume diffusant ou de la cible ponctuelle située à la distance r , en fonction des caractéristiques techniques du radar et des conditions de propagation entre la cible et le radar.

La densité du flux de puissance par unité de surface, à une distance r du radar, pour une puissance totale P_T émise vaut $\frac{P_T}{4.\pi.r^2}$. Elle s'obtient en supposant que toute la puissance P_T

se répartit uniformément sur une surface sphérique de rayon r , centrée au point où est placé le radar. Comme les antennes d'un radar ne sont pas isotropes, mais plutôt directives, la densité de puissance électromagnétique qui en résulte, va dépendre de la direction de propagation.

Dans le système de coordonnées sphériques (r, θ, φ) , elle vaudra $I(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{P_T}{4.\pi.r^2}$ où

$G(\theta, \varphi)$ est le gain de l'antenne démission. La distribution du gain normalisé est : $\frac{G(\theta, \varphi)}{G_0} = F^2(\theta, \varphi)$ où G_0 est le gain maximum. Ce qui nous permet d'écrire $I(\theta, \varphi)$ sous la

forme $I(\theta, \varphi) = \frac{P_T}{4.\pi.r^2} . G_0 . F^2(\theta, \varphi) . L^2$ où L désigne le facteur d'atténuation dans l'atmosphère.

Supposons que l'antenne d'émission soit pointée vers une cible atmosphérique et soit σ , la section efficace de rétrodiffusion de la partie de la cible qu'intercepte le faisceau d'antenne.

La puissance électromagnétique ainsi collecté par la cible est $\frac{\sigma.P_T.G_0.F^2(\theta,\varphi)}{4.\pi.r^2}$. Comme la cible rediffuse isotropiquement cette puissance vers le radar, l'intensité de rayonnement rétrodiffusée vaudra au voisinage de l'antenne de réception $I_R = (\frac{\sigma.G_0.P_T.F^2(\theta,\varphi).L^2}{4.\pi.r^2})/4.\pi.r^2$.

Soit A, la surface effective de l'antenne de reception et p, la puissance collectée par cette antenne. Par définition, on a $A = p / I_R$. D'où l'équation radar dans sa forme classique :

$$p = \frac{\sigma.G_0.P_T.F^2(\theta,\varphi).L^2 A}{(4.\pi.r^2)^2} \quad (2-10)$$

Supposons que l'antenne d'émission et de réception soient identiques. On a

$$G = 4 \pi A / \lambda^2 = G_0 F^2(\theta,\varphi). \text{ Ce qui nous donne } A = \frac{\lambda^2.G_0^2.F^2(\theta,\varphi)}{4.\pi}.$$

La puissance moyenne de l'écho collecté par l'antenne d'ouverture efficace A est pour une cible ponctuelle $p = [\frac{\sigma.G_0.P_T.G_0^2.F^4(\theta,\varphi).\lambda^2.L_r}{(4.\pi)^3}].L^2.\frac{\sigma}{r^4} = C_1.L^2.\frac{\sigma}{r^4}$

Où L_r est l'atténuation dans le récepteur.

Pour une cible distribuée, c'est à dire composée d'un grand nombre d'éléments présents simultanément dans un même volume de résolution V, avec des phases aléatoirement distribuées, la section efficace de rétrodiffusion est égale à $\sum \sigma_i$, la sommation portant sur l'ensemble du volume de résolution. Ce terme peut être écrit sous la forme

$$\sum \sigma_i = V.(\frac{\sum \sigma_i}{V}) = V.\eta. \text{ La quantité entre parenthèses est la section efficace moyenne de la}$$

cible par unité de volume, soit $\eta = (\frac{\sum \sigma_i}{V})$. Elle est appelée, la réflectivité et elle est couramment exprimée en cm^{-1} .

Donc pour une cible distribuée occupant totalement le faisceau, la puissance reçu vaut

$$p = \frac{P_T.G_0^2.\lambda^2.L_r.L^2.\eta}{(4.\pi)^3} \cdot \int \frac{F^4(\theta,\varphi)}{r^4} .dv \quad (2-11)$$

L'élément de volume $dv = r^2 dr d\Omega$ où $d\Omega$ est l'élément de l'angle solide. Le radar voit donc un élément de la surface transversale de la cible se trouvant à la distance r. Ce qui donne

$$p = \frac{P_T \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot L^2 \cdot \eta}{(4\pi)^3} \cdot \int_{\nu} \frac{F^4(\theta, \varphi)}{r^4} \cdot r^2 \cdot d\Omega \cdot dr \quad (2-12)$$

Comme r est grand devant la profondeur du volume de révolution $\frac{c \cdot \tau}{2}$, ses variations dans ce volume sont petite et la quantité $\frac{1}{r^2}$ peut être considérée comme étant constante lors de l'intégration $\int \frac{1}{r^2} \cdot dr = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{c \cdot \tau}{2}$.

Dans la plupart des cas, on peut admettre que la distribution de la puissance dans le lobe principal est convenablement représentée par une fonction gaussienne de la forme [Sauvageot, 1982] :

$$F^2(\theta, \varphi) = \exp\left[-\left(\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta} + \frac{\varphi^2}{2\sigma_\varphi}\right)\right] \quad (2-13)$$

Où σ_θ , σ_φ sont les écarts types de cette distribution. Rappelons que l'effet des lobes secondaires est négligeable car ceux-ci sont inférieurs à 0.2 dB. Après intégration on obtient

$$\int_{\Omega} F^4(\theta, \varphi) \cdot d\Omega = \frac{\pi \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{8 \cdot \ln 2} \quad (2-14)$$

La puissance reçue s'écrit alors :

$$p = \frac{P_T \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot L^2 \cdot \eta \cdot c \cdot \tau}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot r^2} \cdot \int F^4(\theta, \varphi) \cdot d\Omega \quad (2-15)$$

En utilisant l'expression (2-14), la puissance reçue devient :

$$p = \frac{P_T \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot L^2 \cdot \eta \cdot c \cdot \tau \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{1024 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot r^2} \quad (2-16)$$

En posant :

$$C_1 = \frac{P_T \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot c \cdot \tau \cdot \theta_0 \cdot \varphi_0}{1024 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2}$$

Où C_1 est une constante dépend des caractéristiques du radar, la puissance reçu se met sous la forme :

$$p = C_1 \frac{L^2 \cdot \eta}{r^2} \quad (2-17)$$

5. Choix du site

L'emplacement du radar, est très important et nécessaire afin de réduire l'influence des échos du sol ; en d'autre terme, l'emplacement le plus convenable pour un radar météorologique est le centre d'une plaine ou le sommet d'une montagne, car c'est l'endroit où il y a le moins d'obstacles. Cependant, des contraintes liées à l'urbanisation d'une région donnée et à la nature des terrains, ne permettent toujours pas de choisir l'endroit qu'il faut pour installer un radar. D'où, il est impératif de trouver d'autre moyens pour supprimer le clutter de sol.

6. Angle de tir du radar

Pour un fonctionnement idéal du radar, une exploitation adéquate de celui-ci s'impose. Cette exploitation est liée à son angle de tir. En effet, si l'antenne radar est pointée vers le sol, on obtient un signal très fort provenant de la surface terrestre. Lorsque le radar travaille sous incidence rasante, une bonne partie de son faisceau rencontre des cibles atmosphérique et le reste du rayonnement intercepte le sol et produit un signal de retour non négligeable. Si l'antenne est trop élevée vers le ciel, le radar risque de ne pas déceler les zones de précipitations et les nuages qui apparaissent au delà de l'horizon, car la distance séparant ces précipitations du radar est très grande.

7. Application de l'équation radar en météorologie

Pour relier la puissance du signal reçu aux propriétés physiques du milieu observé à l'aide de l'équation radar, on substitue à la réflectivité radar η , par le terme Z appelé facteur de réflectivité.

Si l'on admet que les caractéristiques physiques de la répartition des diffuseurs sont homogènes au sein du volume de résolution, dans les conditions d'approximation de Rayleigh ($D \ll \lambda$), on a :

$$\sigma = \pi^5 \cdot \frac{D^6}{\lambda^4} \cdot |K^2| \quad (2-18)$$

Avec :

$$K = \frac{\varepsilon_c - 1}{\varepsilon_c + 2} \quad (2-19)$$

Où ϵ_c est la constante diélectrique de la particule, et D le diamètre des gouttes de pluie.

La réflectivité radar s'exprime par :

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K^2| Z \quad (2-20)$$

Où Z est le facteur de réflectivité radar défini sur l'ensemble du volume d'impulsion :

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{V} D_i^6 \quad (2-21)$$

Si Z est en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$, et le diamètre des gouttes D en mm et λ en cm, on a :

$$\eta = \pi^5 \lambda^{-4} |K^2| Z \cdot 10^{-12} \quad (2-22)$$

Avec η en cm^{-1} .

Lorsque le volume diffusant observé ne remplit pas les conditions d'approximation de Rayleigh, il est commode de caractériser par le facteur de réflectivité d'une population de particules liquides et sphériques produisant un signal de même puissance.

Pour les mesures de pluie, en posant $|K^2| = 0.93$, la puissance effectivement reçue par la pluie :

$$\eta = 2.8 \cdot 10^{-10} \lambda^{-4} Z_e \quad (2-23)$$

Où Z_e est le facteur de réflectivité radar avec η en cm^{-1} , λ en cm et Z_e est en (mm^6/m^3) .

D'où finalement, la puissance rétrodiffusée par la pluie :

$$\bar{P}_r(mw) = \frac{0.93 \cdot \pi^5 \cdot 10^{-19} \cdot P_e(w) \cdot \tau(\mu s) \cdot G_0^2 \cdot \theta_0(\text{deg}) \cdot \phi_0(\text{deg}) \cdot L_r \cdot Z_e(\text{mm}^6 / \text{m}^3) \cdot L^2}{1,08 \cdot \text{Ln}(2) \cdot 2^{10} \cdot \lambda^2(\text{cm}) \cdot r^2(\text{Km})} \quad (2-24)$$

Le produit des deux premiers facteurs du second membre est une caractéristique C_2 du radar. La puissance reçue peut alors se mettre sous la forme :

$$\bar{P}_r = C_2 \cdot L^2 \cdot \frac{Z_e}{r^2} \quad (2-25)$$

Où C_2 est une constante radar. A cause de la grande dynamique du facteur de réflectivité radar qui peut atteindre 10^7 , on exprime le plus souvent l'équation radar en unité logarithmique (dBZ) sous la forme suivante :

$$10 \text{ Log } (\bar{P}_r) = 10 \text{ Log } (C_2) + 20 \text{ Log } (L) - 20 \text{ Log } (r) + 10 \text{ Log } (Z_e) \quad (2-26)$$

Qui peut encore se regrouper sous la forme suivante :

$$Z_m = 10 \text{ Log } (Z_e) + 20 \text{ Log } (L) - 20 \text{ Log } (r) + s \quad (2-27)$$

Où Z_m est l'écho radar mesuré en dBZ et s est le niveau de référence ou la sensibilité du radar.

La détermination de l'écho radar effectif Z_e nécessite un étalonnage du radar. D'où l'utilité de disposer d'un dispositif capable de stocker les données sous forme numérique.

8. LA RELATION ENTRE LE FACTEUR DE REFLECTIVITE ET L'INTENSITE DES PRECIPITATIONS

Pour déduire les champs d'intensité de pluie à partir des champs d'échos radar, il existe une relation d'étalonnage permettant de convertir les échos radar en intensité de pluie. Cette relation est de la forme suivante :

$$Z = a R^b \quad (2-28)$$

où Z et R sont respectivement le facteur de réflectivité radar exprimée en $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$ et le taux de précipitation exprimée en mm h^{-1} . Les constantes a et b sont déterminées expérimentalement. Elles dépendent essentiellement du climat qui prévaut dans la région considérée et plus particulièrement, de la nature et des caractéristiques granulométriques des précipitations. Cela fait plus d'une quarantaine d'année que le radar est employé pour évaluer l'intensité de pluie. Dans ce contexte, divers modèles ont été développés à partir de travaux expérimentaux, pour déterminer les constantes a et b . Ce sont, par exemple:

- Le modèle de Marshall-Palmer (1948) pour les précipitations stratiformes : $Z = 200 R^{1,6}$
- Le modèle de Jones (1956) pour les précipitations convectives : $Z = 360 R^{1,35}$
- Le modèle de Sekhon et Strivastava (1970) pour la neige : $Z = 1780 R^{2,21}$

Pour des raisons pratiques, il est plus commode de traduire le facteur Z en unités logarithmiques. Sa valeur en dBZ est alors donnée par:

$$Z(\text{dBZ}) = 10 \log [Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)]$$

9. Conclusion

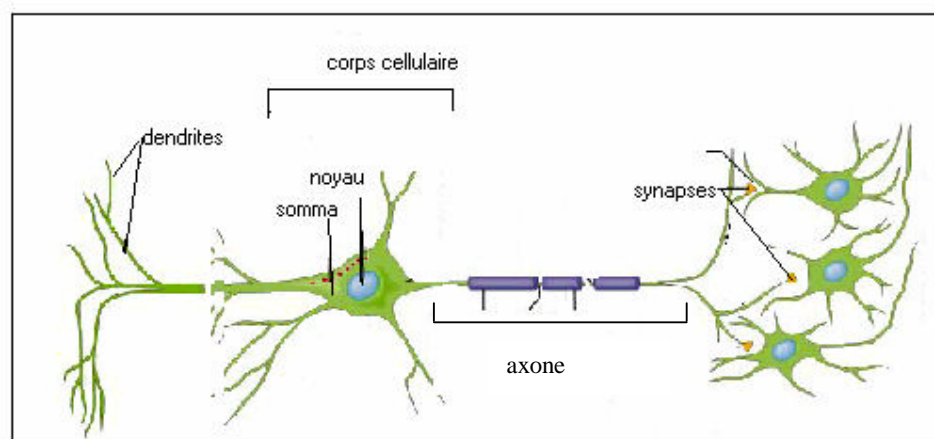
Le radar météorologique est de loin l'instrument le plus utilisé de part le monde pour l'estimation des précipitations. Cependant les images radars sont composés d'échos de précipitations, mais aussi d'échos en provenance de la surface terrestre. Ces derniers réduisent considérablement les performances du radar en induisant des erreurs dans l'estimation et l'identification. Ils sont alors considéré comme des échos parasites par les météorologues. Divers techniques de suppression des échos parasites sont proposées dans la littérature. Ils s'agit principalement des techniques Doppler, Polarimétriques ou M.T.I (annexe B). Dans le cas de radar conventionnels, qui ne sont ni Doppler, ni polarimétriques, on utilise souvent des méthodes statistiques. Dans notre cas, on propose une approche basée sur les réseaux de neurones.

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES RESEAUX DE NEURONES**1. Introduction**

Ces dernières années ont vu l'émergence de nouvelles techniques regroupées sous le nom de connexionnisme ou réseau de neurones artificiels, dont le principe directeur est l'utilisation d'unités de calculs élémentaires fortement interconnectées et dont la connaissance réside précisément dans les interconnexions. L'idée sous-jacente et assez ambitieuse, est de copier l'architecture du cerveau. Ce dernier, qu'il soit humain ou animal est en effet le seul exemple de « machine » intelligente que nous connaissons. Il peut donc paraître naturel de s'en inspirer non seulement au niveau fonctionnel, mais aussi au niveau architectural. Dans ce chapitre nous allons rappeler cette technique très utilisée dans divers domaines tels que la robotique, la classification, l'optimisation, l'approximation et le traitement du signal.

2. Réseau de neurones**2.1 Modèle biologique du neurone**

L'élément fonctionnel de base du système nerveux est le neurone. D'une espèce animale à une autre, les neurones présentent des différences notables. A l'intérieur d'une même espèce, on dénombre de nombreux types de neurones. Les différences portent tant sur des aspects anatomiques que fonctionnels. Cependant des points communs sont à la base de l'archétype de la cellule nerveuse que nous présentons ici. La figure 3.1 représente l'anatomie d'un neurone.

**Fig. 3.1 : Anatomie d'un neurone**

Chaque neurone est une cellule. Autour du noyau, on trouve le corps cellulaire (soma). Celui-ci se prolonge par un axone unique et comporte de nombreuses dendrites qui constituent son organe d'entrée.

a-Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biochimique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient aussi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns de diamètre.

b-Les dendrites

Ce sont de fines extensions tubulaires qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Les signaux envoyés au neurone sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de microns de longueur.

c-L'axone

C'est le long de l'axone que les signaux partent du neurone. Contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones en des endroits appelés synapses. Sa taille peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres.

2.2 Fonctionnement du neurone biologique

Chaque neurone est asservi au maintien d'un gradient électrique (potentiel membranaire) d'environ -50mV entre le milieu extérieur et le soma.

L'influx nerveux est assimilable à un signal électrique, se propageant dans les neurones de la manière suivante :

- Les dendrites reçoivent l'influx nerveux d'autres neurones.
- Le neurone évalue alors l'ensemble de la stimulation qu'il reçoit (c'est à dire sa dépolarisation par rapport à l'extérieur).
- En fonction de cette stimulation (si la dépolarisation est suffisante $>-50\text{mV}$ par exemple), le neurone transmet ou non un signal de type « tout ou rien » le long de son axone, selon

une fréquence fonction du niveau de dépolarisation. On dira alors que le neurone est ou non excité.

- L'excitation du neurone est propagée le long de l'axone jusqu'aux autres neurones ou fibres musculaires qui sont connectés via les synapses.

La figure 3.2 est une interprétation schématique du réseau de la figure 3.1.

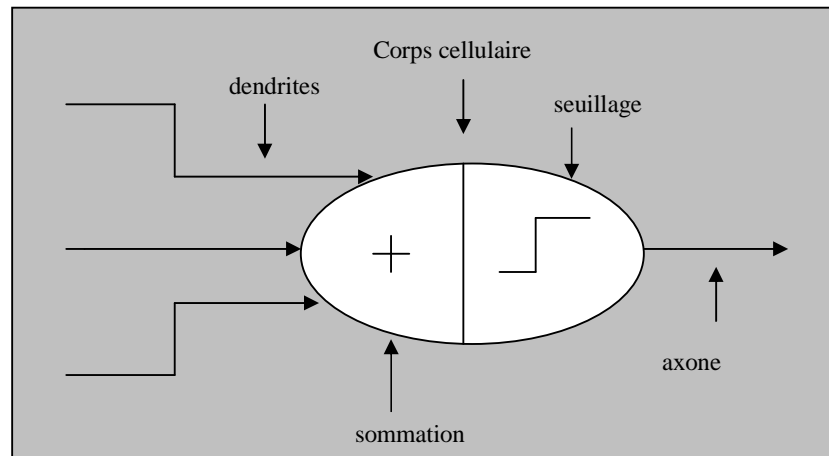


Fig. 3.2 : Schéma simplifié du fonctionnement du neurone

Il s'agit d'un soma effectuant une sommation des influx nerveux transmis par ses dendrites. Si la sommation dépasse un seuil, le neurone répond par un influx nerveux ou potentiel d'action qui se propage le long de son axone. Si la sommation est inférieure à ce seuil, le neurone reste inactif.

2.3. Modèle mathématique du neurone (neurone formel) S'inspirant de leurs travaux sur le neurone biologique Mac culloch et Pitts (1943), ont proposé le modèle représenté dans la figure 3.3.

La plupart des algorithmes connexionnistes en ce moment s'inspirent du modèle de la figure 3.3 dans lequel le neurone fait une somme pondérée des potentiels d'actions qui lui parviennent (chacun de ces potentiels est une valeur numérique qui représente l'état du neurone qui l'a émis), puis s'active suivant la valeur de cette sommation pondérée. Si cette somme dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse (sous forme de potentiel d'action) dont la valeur est celle de son activation. Si le neurone n'est pas activé, il ne transmet rien.

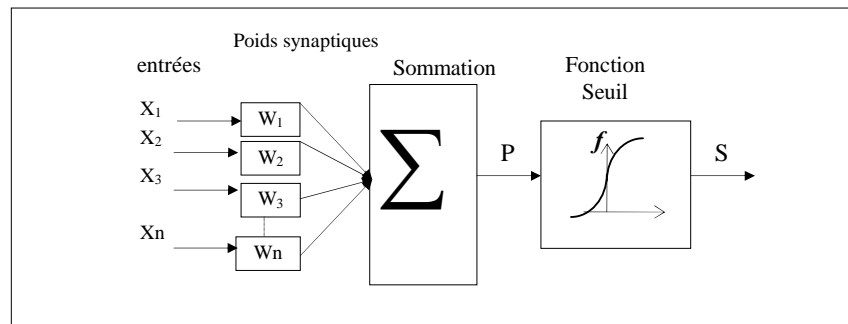


Fig. 3.3 : Modèle mathématique du neurone

D'une façon plus générale, on peut définir un neurone formel par les cinq éléments suivants :

- 1-La nature de ses entrées qui peuvent être binaires ou réelles
- 2-La fonction d'entrée totale P qui définit le prétraitement effectué sur les entrées.

$$\text{Avec} \quad P = \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i \quad (3-1)$$

ou X_i : représente les entrées des neurones

W_i : représente les poids des neurones

3-La fonction d'activation (ou d'état) du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée totale, elle peut être : une fonction binaire à seuil, une fonction linéaire à seuil, une fonction gaussienne, la fonction de heaviside, la fonction sigmoïde la fonction signe. La figure 3.4 représente les différentes fonctions d'activations [Werbos, 1974].

4-La fonction de sortie qui calcule la sortie du neurone en fonction de son état d'activation.

$$\text{Avec} \quad S=f(P) \quad (3-2)$$

5-La nature de la sortie du neurone qui peut être binaire ou réelle.






Pas unitaire		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 > x \\ 1 & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$
Sigmoïde		$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\beta x}}$
Linéaire Seuillée		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq x_{min} \\ mx+b & \text{if } x_{max} > x > x_{min} \\ 1 & \text{if } x \geq x_{max} \end{cases}$
Gaussienne		$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Identité		$f(x) = x$

Fig. 3.4 : Fonctions d'activations

2.4 Construction des réseaux de neurones

Un réseau de neurones peut être représenté par un graphe direct composé d'un ensemble de noeuds ou éléments, processeurs, fortement interconnectés par des liens orientés ou connexion. Les réseaux de neurones peuvent se distinguer par :

- l'architecture
- le mode d'apprentissage

2.4.1 Architecture des réseaux de neurones

Du point de vue architectural (figure 3.4), les réseaux de neurones peuvent être regroupés en deux catégories :

- Les réseaux à circulation de l'information vers l'avant « feed forward networks » dans lesquels les neurones sont organisés en couches. Dans cette catégorie, on distingue les réseaux possédant une seule couche (perceptron) et les réseaux de multicouches possédant une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées.
- Les réseaux récurrents ou bouclés « recurrent / feedback networks » dans lesquels sont classés les réseaux compétitifs, le réseau de Kohonen, le réseau de Hopfield et les modèles ART (théorie de la résonance artificielle).

2.4.2 Apprentissage des réseaux de neurones

La phase d'apprentissage dépend beaucoup de la structure du réseau. Son but est de fixer les poids des connexions. L'apprentissage peut être supervisé, non supervisé ou renforcé.

Dans l'apprentissage supervisé, un professeur qui connaît parfaitement la sortie désirée ou correcte, guide le réseau en lui apprenant à chaque étape le bon résultat.

L'apprentissage consiste alors à comparer le résultat désiré, puis à ajuster les poids des connexions pour minimiser la différence entre les deux. C'est par exemple le cas du réseau multicouche à rétropropagation du gradient ou encore le cas des fonctions à base Radiale.

Pour l'apprentissage non supervisé, le réseau modifie ses paramètres en tenant compte seulement des informations locales. Ces méthodes n'ont pas besoin de sorties désirées préétablies. On cite à titre d'exemple les cartes auto organisatrices de Kohonen.

Dans le cas d'apprentissage renforcé, un professeur est présent, mais la réponse exacte n'est pas présentée au réseau. Cependant, on indique au réseau s'il a calculé la bonne réponse ou non. Le réseau doit donc utiliser cette information pour améliorer ses performances. Typiquement, les poids synaptiques dont les unités possèdent la mauvaise réponse sont rejetés. C'est le cas par exemple des systèmes ART.

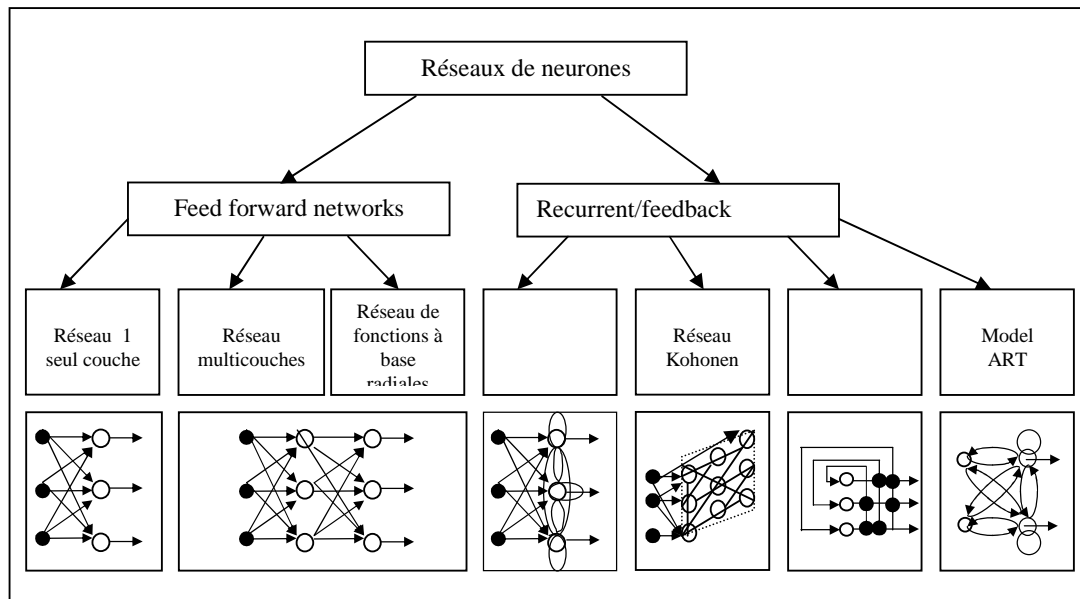


Fig. 3.5 : Différentes architectures des réseaux

La méthode d'ajustement des poids synaptiques pendant l'apprentissage du réseau peut être choisie dans une gamme variée de règles d'apprentissage dont les plus connues sont citées ci dessous :

a. La règle de Hebb (ou règle de corrélation)

En 1949, Hebb propose la première règle d'apprentissage formulée de façon qualitative. Il s'agissait de renforcer la connexion reliant 2 neurones, à chaque fois qu'ils étaient actifs simultanément; dans le cas contraire, elle n'est pas modifiée. Sa formalisation est la suivante :

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha \cdot O_i \cdot O_j \quad (3-3)$$

Où, W_{ij} est le poids de la connexion reliant les neurones O_i et O_j .

α : est un nombre compris entre 0 et 1, représentant le taux d'apprentissage.

t : représente l'étape d'apprentissage.

b. La règle du perceptron

A la fin des années cinquante, Rosenblate présenta le Perceptron qui fut le premier modèle solide. Sa fonction d'activation est une fonction discrète, qui donne des sorties binaires (0 ou 1). La règle d'apprentissage est la suivante :

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha \cdot X_i \quad \text{si la sortie actuelle est 0 et doit être égale à 1.} \quad (3-4)$$

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) - \alpha \cdot X_i \quad \text{si la sortie actuelle est égale à 1 et doit être égale à 0} \quad (3-5)$$

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) \quad \text{si la sortie est correcte.} \quad (3-6)$$

Où, $\alpha > 0$ représente le coefficient d'apprentissage.

X_i : l'entrée du neurone.

W_{ij} : le poids synaptique ou connexion entre i et j.

t : représente l'étape d'apprentissage.

L'inconvénient majeur du perceptron est qu'il ne peut s'appliquer que lorsque les classes sont linéairement séparables. Il ne peut alors réaliser certaines fonctions de parité par exemple XOR.

c. La règle de Windrow-Hoff ou règle delta

Après avoir étudié la règle du perceptron, Windrow et Hoff (1960) constatèrent que le Perceptron se limitait à des sorties binaires. Ils proposent alors une règle intéressante qui consistait à utiliser l'algorithme d'apprentissage du perceptron, en considérant une fonction d'activation continue et différentielle.

Dans le Perceptron, le signal d'erreur utilisé pour calculer la modification des poids est égal à la différence entre la somme pondérée des entrées après le seuillage et le résultat attendu.

Dans la règle de Windrow et Hoff, le signal d'erreur est égal à la différence entre la somme pondérée des entrées non seuillées et le résultat attendu. Cette règle est aussi connue sous le nom de la méthode des moindres carrés dont le principe est :

-Calcul de l'erreur quadratique selon la formule :

$$E = \sum_{j=1}^n (d_j - y_j)^2 \quad (3-7)$$

$$\text{Avec } y_j = \sum_{i=1}^m x_i \cdot w_{ij} \quad (3-8)$$

-Minimiser cette erreur en modifiant les poids de chaque neurone suivant la règle :

$$\text{Où : } W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha \cdot x_i \cdot (d_j - y_j) \quad (3-9)$$

n : le nombre de neurones à la sortie

d_j : est la sortie désirée

y_j : est la sortie calculée

x_i : l'entrée i du neurone j

m : nombre de neurones à l'entrée

α : coefficient d'apprentissage

La règle de Windrow et Hoff pose le problème de l'apprentissage comme un problème de minimisation de l'erreur globale.

d. Règle delta généralisée

La règle de delta généralisée ou encore appelée règle de la rétropropagation du gradient est une généralisation de la règle Windrow et Hoff et s'applique à un réseau multicouche. Elle utilise des fonctions d'activation différentielles et un apprentissage supervisé.

Afin de présenter cette règle, considérons le réseau à 3 couches de la figure 3.6

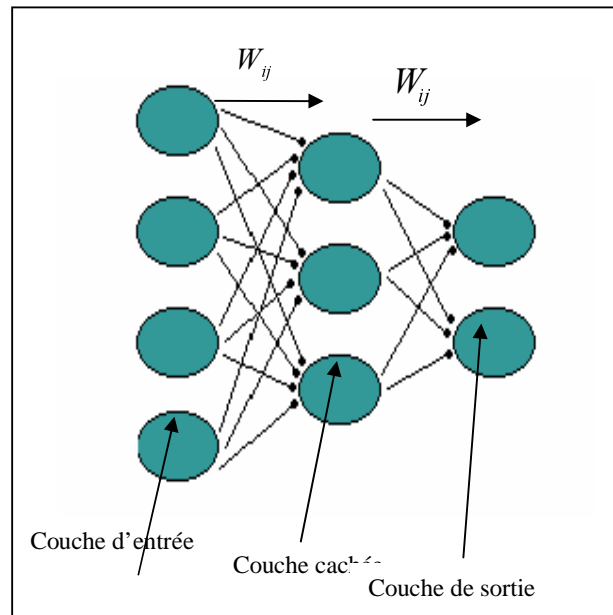


Fig. 3.6 : Réseau multicouches

L'apprentissage fonctionne comme suit :

On dispose d'un ensemble d'exemples qui sont des couples d'entrée / sortie désirés. soient :

$X = (x_1; x_2; \dots; x_n)$ le vecteur d'entrée.

$Y = (y_1; y_2; \dots; y_n)$ le vecteur de sortie désirée.

Soit $S = (s_1; s_2; \dots; s_n)$ le vecteur qui dénote la sortie réelle calculée.

A chaque étape, un exemple est présenté à l'entrée du réseau. Une sortie réelle est calculée par la formule :

$$S_i = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij} \cdot x_i\right) \quad (3-10)$$

Où f dénote la fonction d'activation

Ce calcul est effectué de proche en proche de la couche d'entrée à la couche de sortie. Cette phase est appelée propagation avant.

Ensuite l'erreur quadratique, E , est calculée par la formule suivante :

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - s_i)^2 \quad (3-11)$$

Cette erreur est ensuite retro-propagée dans le réseau, donnant lieu à une modification de chaque poids synaptique. La règle de modification des poids synaptiques est :

$$W_{ji}^{[s]}(t+1) = W_{ji}^{[s]}(t) + \Delta W_{ji}^{[s]}(t) \quad (3-12)$$

$$W_{ji}^{[s]}(t) = \alpha \cdot \delta_j^{[s]} \cdot o_i^{[s-1]} + \gamma \cdot \Delta W_{ji}^{[s]}(t-1) \quad (3-13)$$

Avec $\alpha > 0$, $0 \leq \gamma \leq 1$

Où : $s=1,2,3$ (relativement à la couche d'entrée, la couche cachée, la couche de sortie)

$\delta_j^{[s]}$: l'erreur locale

α : le coefficient d'apprentissage

γ : momentum

Ce processus est répété, en présentant successivement chaque exemple. Si pour tous les exemples, l'erreur est inférieure à un seuil choisi, on dit alors que le réseau a convergé.

e. L'apprentissage compétitif

L'apprentissage compétitif se fait par coopération et compétition entre les neurones. Les algorithmes d'apprentissage compétitif tentent de minimiser une fonction de distorsion entre un vecteur d'entrée x_i et un vecteur de poids. La règle de modification des poids synaptiques est donnée par l'équation suivante :

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha(x_i - W_{ij}^+) \quad (3-14)$$

W_{ij} : le poids synaptique ou connexion entre i et j .

α : coefficient d'apprentissage.

t : le temps d'apprentissage.

W_{ij}^+ : le poids synaptique du neurone gagnant.

2.5 Propriété des réseaux de neurones

L'intérêt principal porté aux réseaux de neurones tient sa justification dans les propriétés suivantes :

a. La capacité d'apprentissage

Comme l'être humain, un réseau de neurones apprend à résoudre des problèmes à partir d'exemples.

b. La capacité de généralisation

La capacité de généralisation se traduit par la capacité d'un système à apprendre et à retrouver, à partir d'un ensemble d'exemples des règles qui permettent de résoudre un problème donné non appris.

c. Le parallélisme

Cette notion se situe à la base de l'architecture des réseaux de neurones considérés comme un ensemble d'entités élémentaires qui travaillent simultanément. Le parallélisme permet une rapidité de calcul supérieure mais exige de penser et de poser les problèmes différemment.

2.6 Application des réseaux de neurones

On peut citer quelques-unes des caractéristiques des problèmes bien adaptés à une résolution par les réseaux de neurones :

- Les règles qui permettent de résoudre le problème sont inconnues ou très difficiles à expliciter ou formaliser. Cependant, on dispose d'un ensemble d'exemples qui correspondent à des entrées du problème et aux solutions qui leur sont données par des experts.
- Le problème fait intervenir des données contaminées de bruits.
- Le problème peut évoluer, par exemple en faisant varier ses conditions initiales.
- Le problème nécessite une grande rapidité de traitement, il doit par exemple être traité en temps réel.

On peut donc dresser une liste des domaines d'applications privilégiés :

- Robotique
- Classification et reconnaissance de formes
- Approximation de fonctions
- Optimisation
- Traitement du signal.

3. Conclusion

Après avoir passé en revue les deux catégories de réseaux de neurones et les différentes règles d'apprentissage, nous avons opté pour une classification des échos radar par les cartes auto-organisatrices de Kohonen. Cette approche nécessite un apprentissage non supervisé, qui par conséquent, peut s'appliquer pour n'importe quel site une fois les critères d'apprentissage et de reconnaissance de chacun des échos radars sont bien établis.

CHAPITRE IV : ALGORITHME DE KOHONEN ET APPLICATION A LA CLASSIFICATION DES ECHOS RADAR

1. Introduction

Dans cette partie, nous allons rappeler les grandes lignes des travaux du chercheur, Teuvo Kohonen (1982) en présentant d'abord le cadre général dans lequel il a étudié les réseaux de neurones. Puis, nous allons passer en revue les différents modèles qu'il a proposés en rappelant leurs fondements neurobiologiques, et leurs développements mathématiques.

2. Fondements neuro-biologiques

Les cartes auto-organisatrices de Kohonen sont du type de réseaux à apprentissage non supervisé et qui s'inspirent de la modélisation des systèmes de perception, tels que la vue ou l'ouïe, chez les mammifères. Dans ces systèmes, on a d'abord réception de signaux extérieurs, puis traitement à l'intérieur du système nerveux. Leur principale propriété est de pouvoir *coder* sur des neurones voisins des signaux d'entrée qui se ressemblent.

Pour établir les règles d'apprentissage du réseau, Kohonen (1982) est parti d'observations biologiques, puis il a déduit les caractéristiques suivantes :

- Chacun des neurones qui composent le réseau répond d'une manière spécifique à un type de stimulus. Pour cela, si nous envisageons d'utiliser ce réseau pour résoudre un problème de classification, il suffit d'affecter à chaque classe de stimulus un neurone particulier.
- Kohonen (1982) a pu montrer qu'entre les neurones des cellules réceptrices, il existait un mécanisme d'interaction latérale qui dépendait de la distance entre les neurones concernés. Cette dépendance est représentée par la fonction dite du « chapeau mexicain » (mexican-hat function) (voir figure 4.1).

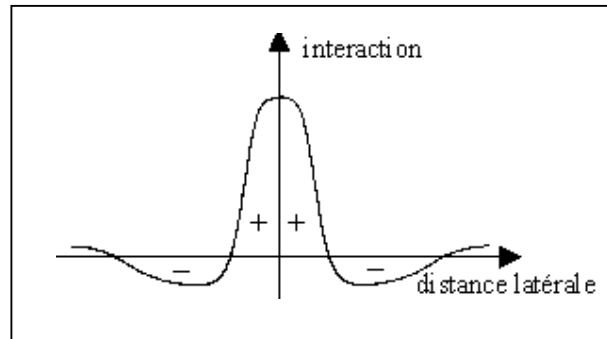


Fig. 4.1 : La fonction chapeau mexicain [d'après Kohonen,1982]

Dans cette figure le symbole '+' correspond à l'excitation et le symbole '-' à l'inhibition. Cette courbe s'interprète comme suit :

- Dans une zone latérale proche du neurone stimulé, les neurones qui lui sont connectés ont une action excitatrice (augmentation des poids synaptiques).
- Dans un voisinage plus lointain, leur action est inhibitrice (diminution des poids synaptiques)
- L'action des neurones plus lointains est négligeable.

3. Conséquences

Si l'on veut simuler un réseau qui tienne compte des deux observations neuro-biologiques précédentes, il faudra s'assurer qu'il vérifie bien les points suivants :

- Chaque cellule du réseau doit correspondre à un stimulus spécifique.
- L'interaction latérale entre les neurones doit provoquer la formation d'amas de neurones excités autour du neurone le plus activé par le stimulus.

La règle proposée par Kohonen se décompose en deux étapes,, permettant de rendre compte successivement des deux impératifs précédents et qui se résument à :

- 1- L'élection du neurone qui correspondra à un type de signal d'entrée donné.
- 2- L'augmentation de l'activation de ce neurone et du groupe de neurones qui l'entourent lorsque ce signal d'entrée est présenté ; ce qui revient à accroître la correspondance entre ce neurone et son voisinage avec le signal d'entrée considéré.

4. Algorithme de Kohonen

4.1 Fonctionnement du réseau

Soit la carte auto-organisatrice de Kohonen donnée par la figure 4.2

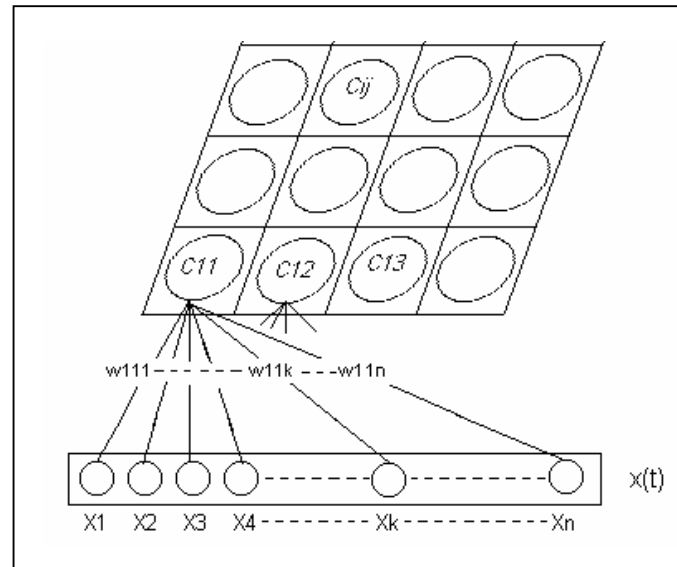


Fig. 4.2 : Carte auto-organisatrice de Kohonen

Où

C_{ij} : cellule de la carte de Kohonen.

$X(t)$: vecteur d'entrée à l'instant t .

X_k ($k \sim 1..n$) : les composantes du vecteur d'entrée.

W_{ij} : connexions externes de la cellule C_{ij} .

L'algorithme de Kohonen peut être décrit comme suit :

Après initialisation des vecteurs $W_{ij}(0)$ à de faibles valeurs aléatoires, on les compare à chaque instant t au vecteur $X(t)$. Pour chaque itération t , on choisit le vecteur vainqueur $W_V(t)$, qui est le plus proche (au sens d'une certaine distance, souvent euclidienne) de $X(t)$. Ce vecteur, ainsi que l'ensemble des vecteurs $W_{ij}(t)$ des neurones voisins sur la carte sont modifiés de façon à être rapprochés de $X(t)$ avec un certain gain $\alpha(t)$.

L'algorithme de Kohonen comporte deux principales phases, à savoir, la phase d'apprentissage du réseau et la phase de reconnaissance.

4.1.1 Phase d'apprentissage

Pendant l'étape d'apprentissage, chaque cellule calcule la distance euclidienne entre son vecteur W_{ij} et l'exemple $X(t)$ qui est présentée à l'entrée du réseau à l'instant t . Ce calcul peut être exprimé par [Kohonen, 1990] :

$$d_{ij} = \text{dist}(X(t), W_{ij}) = \left[\sum_{k=1}^n (W_{ijk} - X_k)^2 \right]^{1/2} \quad (4-1)$$

Après avoir calculé les distances pour tous les neurones, on cherche le neurone vainqueur, c'est-à-dire celui dont le vecteur de poids est le plus proche de l'exemple $X(t)$. Ce neurone et ses proches voisins sont modifiés afin d'être proches de l'exemple selon les expressions suivantes :

$$W_{ijk}(t+1) = \begin{cases} W_{ijk}(t) + \alpha(t)[X_k(t) - W_{ijk}(t)] & \text{pour } i, j \in N(t) \\ W_{ijk}(t) & \text{pour } i, j \notin N(t) \end{cases} \quad (4-2)$$

Où :

$\alpha(t)$ est le gain d'apprentissage, $0 \leq \alpha(t) \leq 1$.

$N(t)$ est le voisinage du neurone vainqueur fixé par la fonction 'chapeau-mexicain'

L'application de cette fonction est compliquée à mettre en œuvre pour déterminer le voisinage. Pour cela, elle est souvent approximée par la fonction "porte d'ouverture 'a'" (figure 4.3). La distance a désigne le voisinage du neurone vainqueur.

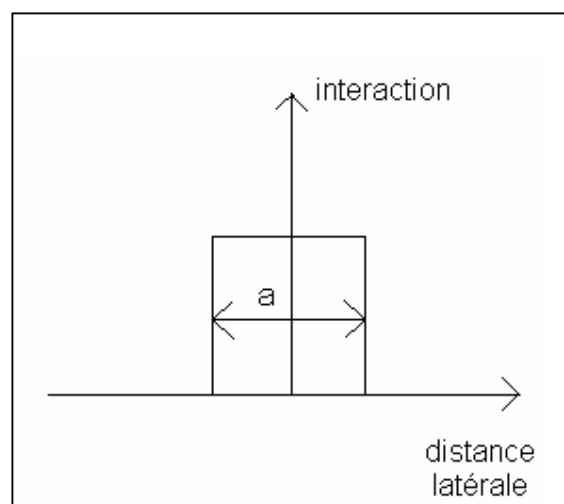


Fig. 4.3 : La fonction porte d'ouverture 'a' [D'après Kohonen, 1982.]

Cette courbe se traduit au niveau de la carte comme un carré autour du neurone vainqueur (voir figure 4.4) :

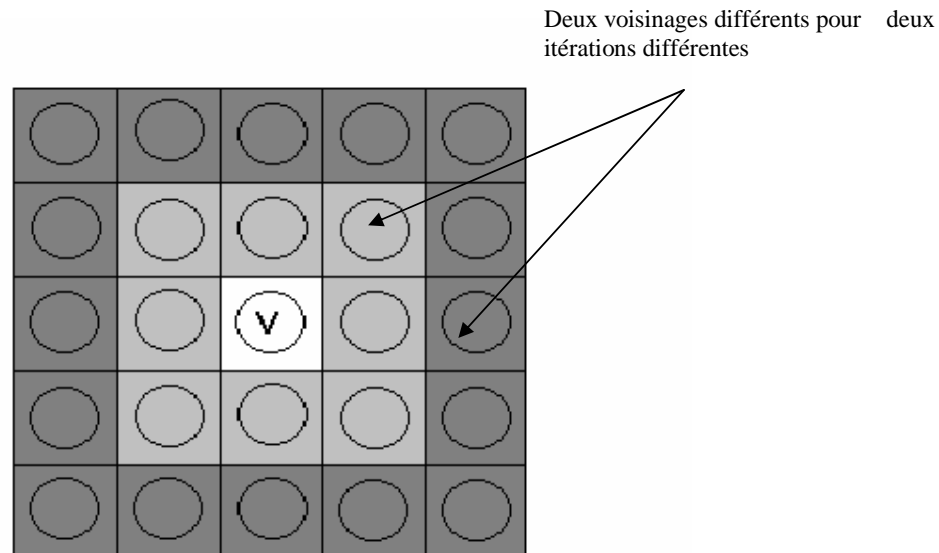


Fig. 4.4 : Notion de voisinage dans les versions classiques de l'algorithme

Des résultats expérimentaux montrent que la convergence de l'algorithme peut être accélérée si le voisinage N est modifié durant l'apprentissage. Kohonen (1989) propose de changer l'ouverture du voisinage de la façon suivante:

Au cours des premières itérations, le voisinage doit être choisi assez large de l'ordre de la taille de la carte, et de le réduire de façon monotone avec le temps. Ainsi, vers la fin de l'apprentissage, le calcul n'est effectué que pour le seul neurone vainqueur W_v (figure 4.4).

4.1.2 Test de fin d'apprentissage

L'apprentissage peut être arrêté au moment où la modification des poids demeure insignifiante et reste inférieure à un certain seuil, et cela pour tous les exemples de la base d'apprentissage. Dans ce cas, on peut supposer que le réseau a déjà appris tous les exemples et que les changements sur la carte ne seront plus significatifs. Si ce seuil n'est pas atteint, le calcul n'est arrêté qu'après NbI itérations. Notons que le paramètre NbI détermine en même temps la vitesse à laquelle l'ouverture du voisinage ainsi que le gain d'apprentissage sont modifiés puisque l'incrément du temps est $\delta t = t / NbI$.

4.1.3 Initialisation aléatoire des poids

En général, l'apprentissage est réalisé avec des données qui sont normalisées sur $[0,1]$ ou $[-1,1]$ et ceci afin d'accélérer le processus d'auto-organisation de la carte [Kohonen, 1989].

4.1.4 Choix aléatoire des exemples

L'apprentissage des cartes auto-organisatrices de Kohonen est fréquemment présenté pour des problèmes correspondant à un nombre d'exemples assez important, souvent plus grand que le nombre d'itérations. Dans ce cas, on peut utiliser un tirage aléatoire des exemples de la base d'apprentissage. Pour des problèmes ayant un nombre d'exemples plus petit que le nombre d'itérations, il propose une présentation cyclique de la base.

4.1.5 Présentation de l'algorithme de Kohonen

4.1.5.1 Présentation de l'algorithme d'apprentissage

Soient les paramètres suivants :

$X(t)$ l'exemple choisi à l'étape t ,

$W_{i,j}$ le vecteur de poids du neurone $C_{i,j}$

N la taille de la carte ($N*N$ neurones),

$D_{i,j}$ la matrice distance euclidienne entre $W_{i,j}$ et $X(t)$,

$D_{min\ i,j}$ le minimum des éléments de $D_{i,j}$,

$\alpha(t)$ le gain d'apprentissage à l'étape t ,

$\Delta_{i,j}(t)$ la valeur de modification du neurone $C_{i,j}$, à l'étape t ,

NbI le nombre d'itérations,

$\delta t = t / NbI$ l'unité incrémentale du temps t ,

max_modif la modification maximale,

$seuil_appr$ le seuil des modifications déterminant la fin de l'apprentissage.

Le programme permettant l'apprentissage du réseau se résume aux étapes suivantes :

- On procède d'abord à l'initialisation aléatoire des vecteurs $W_{i,j}$
- $t = 0 : \delta t = t / NbI$
- On prend le premier exemple $X(t)$ de la base d'apprentissage et on calcule la distance euclidienne entre $X(t)$ et $W_{i,j}(t)$ comme suit :

pour $i = 1$ à N **Faire**

pour j = 1 à N Faire

$$d_{ij} = \text{dist}(X(t), W_{ij}) = \left[\sum_{k=1}^n (W_{ijk} - X_k)^2 \right]^{1/2}$$

Fin_pour

Fin_pour

On désigne ensuite le neurone vainqueur W_v qui correspond à la distance minimale $d_{\min} = \min d_{ij}$ et on procède à la mise à jour des neurones voisins du neurone vainqueur désigné en les rapprochant de l'échantillon étudié:

Pour i = 1 à N Faire

pour j = 1 à N Faire

si le neurone $C_{i,j} \in N(t)$

Alors

$$\Delta_{i,j}(t) = \alpha(t)[X_k(t) - W_{ijk}(t)]$$

$$W_{ijk}(t+1) = W_{ijk}(t) + \Delta_{i,j}(t)$$

Sinon $W_{ijk}(t+1) = W_{ijk}(t)$

Fin_pour

Fin_pour

Max_modif = max_{i,j}($\Delta_{i,j}$)

Fin = test_de_fin(max_modif,t)

t = t + δt

On répète ces différentes opérations pour toute la base d'apprentissage.

4.1.5.2 Etiquetage des neurones

Une fois l'apprentissage terminé, on doit impérativement examiner les liens entre les poids W_{ij} et les exemples de la base d'apprentissage afin de déterminer l'ensemble des réponses que le réseau est capable de fournir. Cette étape est appelée «l'étiquetage des neurones».

Pour choisir un neurone comme étant le représentant de l'exemple étudié, nous utilisons l'hypothèse suivante : l'exemple est appris par la carte si et seulement s'il existe au moins un neurone dont la distance euclidienne est plus petite qu'un certain seuil (seuil d'étiquetage).

Par conséquent, le neurone représente l'exemple le plus proche si la distance euclidienne entre son vecteur W_{ij} et l'exemple, est plus petite que le seuil d'étiquetage. Dans ce cas, on affecte au neurone l'étiquette (l'information) de cet exemple. Si la distance minimale est plus grande que le seuil d'étiquetage, le neurone ne correspond à aucun exemple de la base d'apprentissage et donc l'état qu'il représente est inconnu. L'étiquette qu'on lui affecte peut être exprimée par "je ne sais pas". Notre algorithme d'étiquetage se présente comme suit :

Soient les paramètres suivants :

ex (e) l'exemple d'ordre 'e' de la base d'apprentissage

$de_{ij}(e)$ la matrice distance euclidienne entre l'exemple $ex(e)$ et les différents neurones W_{ij}

-On calcule les écarts entre l'exemple choisi et les différents neurones de la carte :

Pour $i = 1$ à N **faire**

Pour $j = 1$ à N **faire**

Pour $e = 1$ à nb_{exapp} (nombre d'exemples à apprendre) **faire**

 -On calcule la distance euclidienne entre l'exemple à apprendre $ex(e)$ et W_{ij} :

$$de_{ij}(e) = \text{dist}(ex(e), W_{ij})$$

Fin_pour

Fin_pour

Fin_pour

-On sélectionne les neurones représentant l'exemple en question :

-On détermine les neurones qui représentent l'exemple $ex(e)$ avec la distance dm_{ine} :

$$dm_{ine} = \min(de_{ij}(e))$$

Si $dm_{ine} \leq$ seuil d'étiquetage

Alors $label_neurone(i,j) = label(ex(e))$

Sinon $label_neurone(i,j) = non_défini$

Fin_si

4.1.6 Phase de reconnaissance

La phase de reconnaissance se présente comme la dernière étape de notre algorithme pour la classification. Cette classification consiste à reconnaître et à identifier les exemples de la base de données à traiter et à les affecter aux classes retenues lors de la phase d'apprentissage. Pour ce faire on examine le degré de similitude entre l'exemple qui se

présente à l'entrée du réseau et chacune de ces classes. Notre algorithme de reconnaissance se présente comme suit :

Soient les paramètres suivants :

$ex^*(e)$ l'exemple d'ordre 'e' de l'ensemble des exemples à traiter

$de^*_{ij}(e)$ la matrice distance euclidienne entre l'exemple $ex^*(e)$ et les différents neurones W_{ij}

-On calcule les écarts entre l'exemple à traiter et les différents neurones de la carte :

Pour $i = 1$ à N **faire**

Pour $j = 1$ à N **faire**

Pour $e = 1$ à $nbexatr$ (nombre d'exemples à traiter) **faire**

 -On détermine la distance euclidienne entre l'exemple à traiter $ex^*(e)$ et W_{ij} :

$$de^*_{ij}(e) = \text{dist} (ex^*(e), W_{ij})$$

Fin_pour

Fin_pour

Fin_pour

-On sélectionne les neurones représentant l'exemple en question :

On détermine le neurone (i,j) avec la distance dm_{ine} :

$$dm_{ine} = \min(de^*_{ij}(e))$$

Si $dm_{ine} \leq$ seuil de reconnaissance

Alors $label_ex^*(e) = label_neurone(i,j)$

Sinon $label_ex^*(e) = non_défini$

Fin_si

5. Variantes de l'algorithme

L'algorithme d'apprentissage de Kohonen décrit ci-dessus peut être utilisé avec succès dans plusieurs champs d'applications. Cependant, Kohonen propose des variantes qui peuvent augmenter les capacités de reconnaissance.

De ce fait, il est nécessaire d'adapter cet algorithme aux problèmes à résoudre et ceci en posant ses propres règles. Les bases des mécanismes d'auto-adaptation demeurent toujours :

-1 La localisation du neurone adéquat.

-2 Le renforcement de cette adéquation pour ce neurone et ses voisins.

6. Application de l'algorithme de Kohonen à l'identification des échos du sol

6.1 Données expérimentales

Cette identification porte sur les nuages (signal utile) dans les images radar contaminées par les échos parasites provenant de la surface terrestre, à savoir les échos fixes et les anaprops. Deux sites radar ont été considérés dans cette étude. Il s'agit des images collectées dans les régions de Bordeaux (France), Sétif (Algerie).

Notre banque de données est composée de 10 052 images prises à Bordeaux et de 5799 images collectées à Sétif. Ces images ont été prises par deux radars pulsés différents et non cohérents. Les spécifications techniques de ces radars sont indiquées dans la table 4.1.

Paramètres du radar	Bordeaux	Setif
Fréquence d'émission	2,8 GHz	5,6 GHz
Puissance d'émission	700 kW crête	250 kW crête
Gain de l'antenne	40 dB	30 dB
Sensibilité à la réception	-105 dBm	-110 dBm
Résolution spatiale	1 km x 1km	1 km x 1km
Durée de l'impulsion	2 μ s	2 μ s
Diamètre de l'antenne	4 m	3 m
Ouverture du faisceau à 3 dB	1,9 °	1,1 °

Table 4.1. Caractéristiques techniques des radars de la région de Bordeaux et de Setif.

Toutes les images sont enregistrées suivant le mode PPI (Plan Position Indicator). Elles sont représentées selon le format 512x512 pixels avec une résolution de 1 km par pixel. Le nombre de niveaux de gris codant chaque pixel de ces images est de 52 pour Bordeaux et 16 pour Sétif.

Le radar de Bordeaux est situé au niveau de l'aéroport de Bordeaux Mérignac. Il est installé sur une tour à 70 m d'altitude et constitue un élément du réseau radar français opérationnel géré par Météo-France. Ses coordonnées géographiques sont 44° 52' N de

latitude et $0^{\circ} 30'$ W de longitude. La région de Bordeaux est une partie importante du sud-ouest de la France. Elle est plutôt plate. A l'intérieur d'un rayon de 150 km autour du radar, l'altitude est au dessous de 200 m, à l'exception de la zone nord-est, où l'on rencontre le premier contrefort du Massif Central situé à une distance du radar un peu supérieure à 130 km et culminant à 400 m. Plus loin, au sud, à une distance de 200 km du radar, se présentent les montagnes des Pyrénées qui s'élèvent à 3000 m d'altitude. Les images radar sont en grande partie contaminées par les échos fixes du sol causés par la zone industrielle de Bordeaux. En outre, les échos A.P (Anomalous propagation) produits par les collines et les montagnes voisines, apparaissent également de manière fréquente dans ces images (voir figure 4.5). Le climat de la région de Bordeaux est océanique. Les conditions climatiques sont généralement homogènes. Toutefois, les systèmes frontaux sont souvent réduits à une ligne convective en été. La plupart des phénomènes pluvieux observés dans cette région sont des perturbations cycloniques frontales régionales. L'intensité moyenne annuelle de précipitations est d'environ 800 mm. En raison des orages fréquents, les précipitations sont plus intenses en été qu'en hiver. Pour cela, nous avons opté d'étudier les images radar prises de juin à septembre 1996. Ces images ont été collectées quotidiennement toutes les cinq minutes suivant le mode CAPPI (Constant Angle Plan Position Indicator), avec un angle d'élévation du rayon égal à $1,5^{\circ}$ pour des distances inférieures à 50 km et $0,4^{\circ}$ pour des portées supérieures à 50 km.

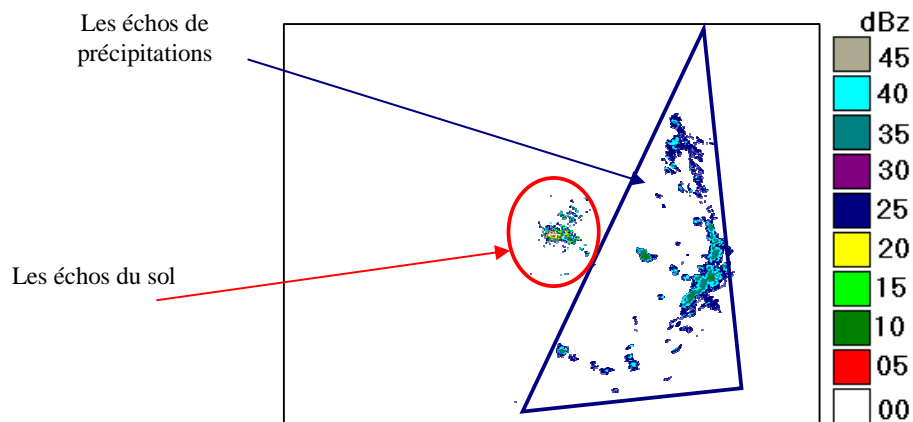


Fig. 4.5 : Image radar brute prise à Bordeaux.

Le radar installé près de la ville de Sétif, à $36^{\circ} 11'$ N de latitude, $5^{\circ}25'$ E W de longitude et 1700 m d'altitude, est l'un des sept radars du Réseau Météorologique Algérien. Il est associé à une chaîne SANAGA (Système d'Acquisition Numérique pour l'Analyse des

Grains Africains) qui est un système d'acquisition et de numérisation des images [Sauvageot et Despaux, 1990].

La région de Sétif fait partie des Hauts Plateaux de l'Algérie. Plusieurs obstacles terrestres existent autour du radar et les échos du sol les plus proches sont produits, en grande partie, par la zone industrielle. Au-delà de l'horizon, les obstacles terrestres produisent plusieurs échos du sol dans les images radar (voir figure 4.6). Par exemple, au sud-ouest, à 60km du radar, on trouve les montagnes de Djurdjura qui atteignent 2300 m d'altitude. Au sud-est, à 40 km du radar, on rencontre les monts du Bibans avec 1417m de hauteur. Au nord-est, à une distance plus courte (environ 30 km du radar), les monts du Babors s'élèvent à 2004 m d'altitude. Le climat de Sétif est continental. En hiver, les perturbations atmosphériques proviennent principalement du nord-ouest. En été, on observe des masses de nuages arrivant notamment du sud-est. L'intensité moyenne annuelle de précipitations est de 400 mm dans la région. Cette dernière traverse une période de sécheresse depuis une dizaine d'années. Il pleut principalement durant les mois de décembre, janvier, février et avril. Ainsi, les images étudiées sont celles prises par le radar de Sétif durant la période de janvier à février 2000.

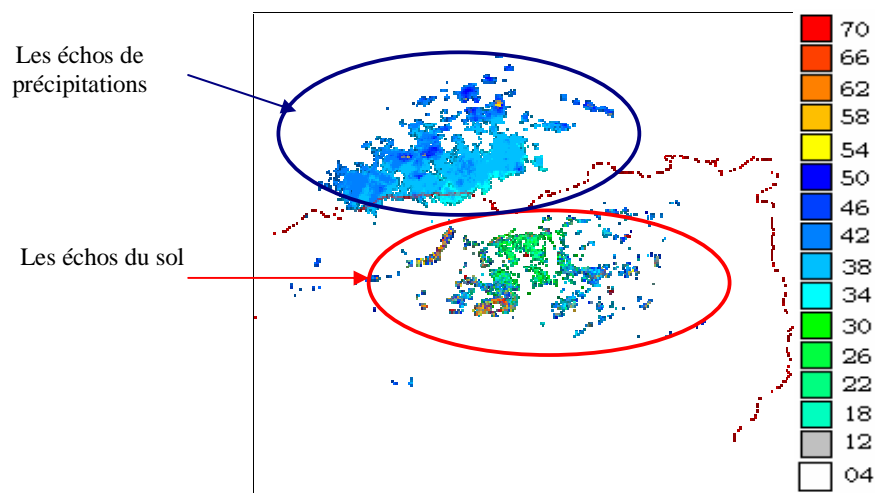


Fig. 4.6 : Image radar brute prise à Setif.

6.2 Traitement des données

Notre travail consiste à distinguer les échos de précipitation des échos parasites dans les images radar. Pour ce faire, une étude préalable des propriétés caractérisant les deux types d'échos a été abordée pour chacun des deux sites considérés, et ceci dans le but de déterminer

les critères d'identification des échos en provenance de la surface terrestre et les échos de précipitations.

6.2.1 Analyse des différents échos

a. Le site de Sétif

Les images issues du radar de Sétif sont principalement composées d'échos du sol et d'échos de précipitations. A travers notre banque de données, nous avons constaté que la propagation anormale se manifeste peu dans cette région.

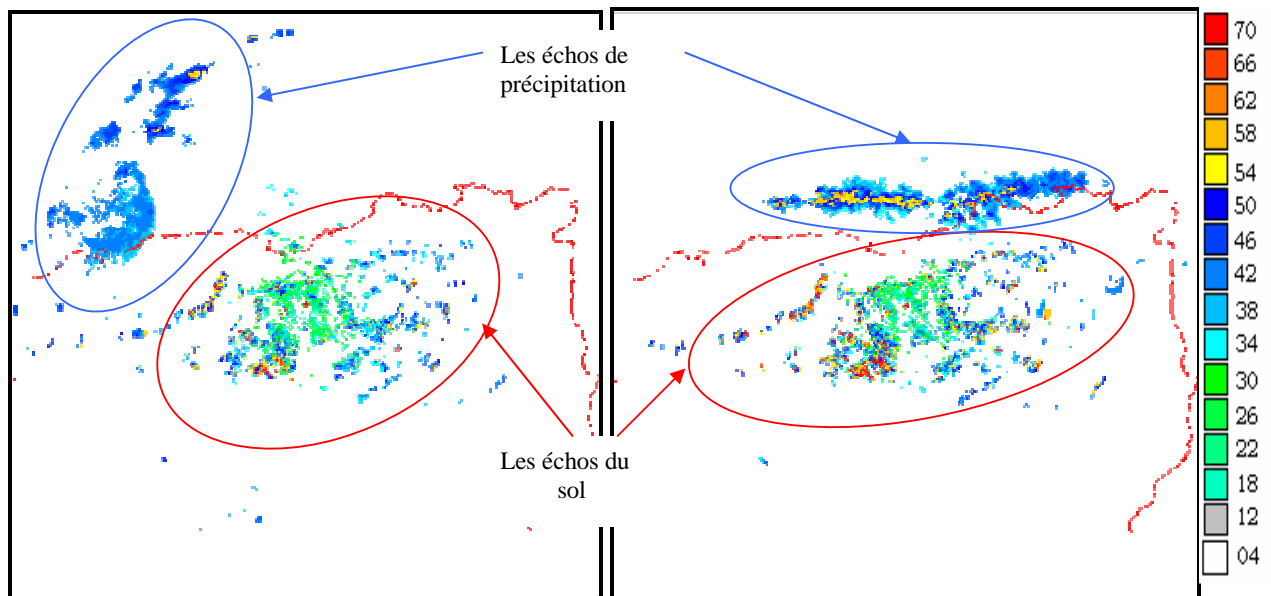


Fig. 4.7 : Images radar prises à Sétif

Pour le site de Sétif, les échos du sol se réduisent aux échos fixes causés par la zone industrielle de Sétif et les montagnes entourant le radar. En outre, la structure des échos de précipitations est plus homogène que celle des échos parasites [Sadouki, 2003 ; Haddad *et al.*, 2004] De ce fait, la forme et l'endroit des échos du sol peuvent être appris par l'algorithme pour servir comme modèle de comparaison avec chaque nouvelle image à traiter. Outre cette comparaison, nous pouvons utiliser l'homogénéité des nuages ou la pixellisation des échos du sol comme propriétés caractérisant chacun des deux types d'échos. Par conséquent, deux critères d'identification ont été retenus. Il s'agit de :

- La forme quasi-régulière des échos du sol
- l'homogénéité des échos de précipitation.

b. Le site de Bordeaux

Les images de Bordeaux sont contaminées non seulement par les échos fixes causés par la zone industrielle de Bordeaux, mais aussi par les échos A.P provenant des montagnes des Pyrénées. Rappelons que la propagation anormale s'est manifestée pendant plus de 20 % du temps au cours de l'année 1996 [Haddad et *al.*, 1999]. De ce fait, les images de Bordeaux sont composées de trois types d'échos qui sont les échos de précipitations, les échos fixes et les échos A.P.

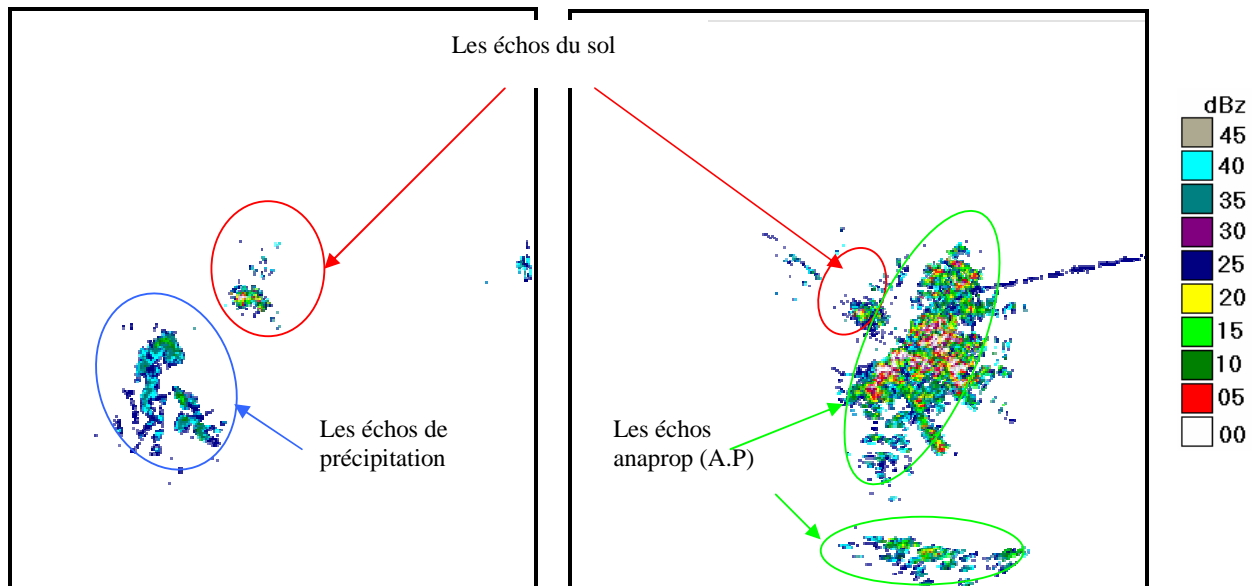


Fig. 4.8 : Les différents échos du site de Bordeaux

Les propriétés texturales des échos fixes et des échos de précipitations pour le site de Bordeaux sont identiques à celles observés pour la région de Sétif [Sadouki, 2003]. Dans le cas des images de Bordeaux, la difficulté réside dans l'identification et l'élimination des échos A.P. En effet, ces derniers se présentent à des endroits qui varient d'une image à l'autre selon les conditions atmosphériques. Le critère d'homogénéité restera le meilleur moyen pour que le réseau puisse les identifier. D'autre part, ces échos, par opposition aux échos de précipitations dont la structure est homogène, sont constitués d'une grande variété de pixels à forte réflectivité ; ce qui rend leurs images très pixélisées. Par conséquent, les critères de comparaison dans le cas des images de Bordeaux seront :

- La forme quasi régulière des échos du sol.
- l'homogénéité des échos de précipitations.
- L'inhomogénéité ou la pixellisation des échos A.P

6.2.2 Adaptation de l'algorithme de Kohonen à l'identification des échos de précipitation

Pour adapter l'algorithme de Kohonen à notre application, nous avons adopté la démarche suivante :

- Fixer la taille de la carte de Kohonen à celle de l'image de façon que chaque pixel de l'image corresponde à un neurone [Ashish Ghosh *et al.*, 1990].
- Choisir des vecteurs d'entrée à trois composantes de base ROUGE, VERT et BLEU constituant la couleur du pixel de l'image d'entrée. La valeur de chacune des trois composantes varie entre '0' et '1'.
- Par conséquent, chaque neurone de la carte de Kohonen comporte trois composantes.

La figure 4.9 montre la forme du réseau :

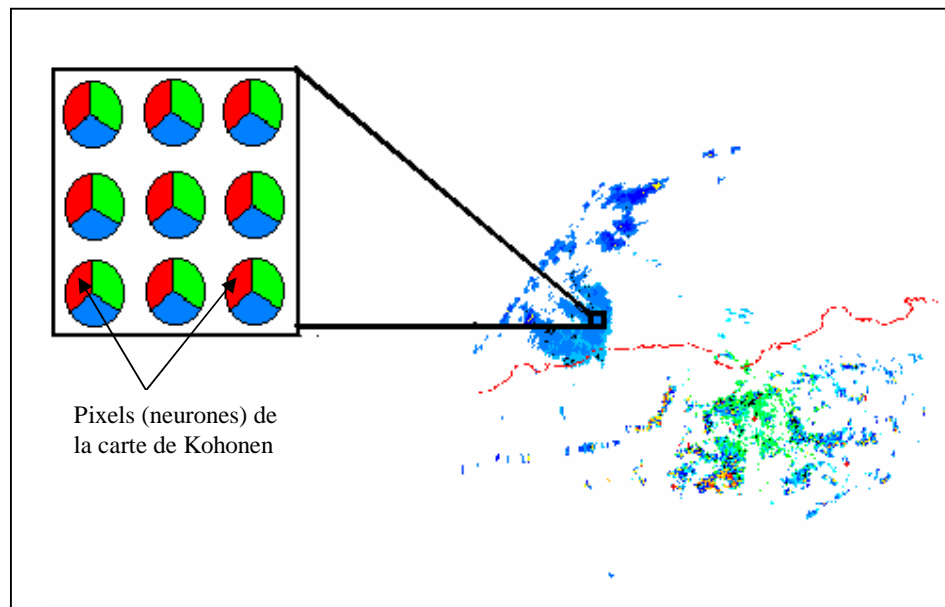


Fig. 4.9 : Initialisation de la carte de Kohonen pour une image d'entrée

6.2.3 Les différentes étapes de l'algorithme de Kohonen

L'algorithme de Kohonen comporte deux principales phases, à savoir, la phase d'apprentissage du réseau et la phase de reconnaissance. Dans notre application, l'étape d'apprentissage se résume comme suit :

- l'extraction et l'apprentissage de la forme des échos du sol en analysant plusieurs images. Cette opération se fait une seule fois pour chaque site étudié.
- L'extraction et l'apprentissage de la forme des nuages, en se basant sur l'homogénéité du nuage, et ceci pour chaque image à étudier.

6.2.3.1 La phase d'apprentissage

a. Apprentissage de la forme des échos du sol

Pour procéder à l'apprentissage de la forme des échos du sol, une base de donnée d'une dizaine d'images est choisie. L'initialisation de la carte de Kohonen se fait arbitrairement et ceci en optant pour une image quelconque prise de cette base. L'opération suivante consiste à calculer la distance euclidienne entre chaque neurone de la carte et son pixel correspondant (du même rang) dans l'image d'entrée. Ainsi, on obtient une matrice 'distances euclidiennes'. On détermine le MAX de cette matrice qui correspond au neurone le plus éloigné de l'image d'entrée. Pour sélectionner les neurones concernés par la mise à jours (neurones gagnants), le MAX est multiplié par un facteur 'n' qui varie entre 0 et 1 au cours de l'apprentissage. Ainsi, tous les neurones dont la distance euclidienne est inférieure ou égale à $n \cdot d_{MAX}$ (seuil de mise à jour) verront leurs poids modifiés suivant la formule suivante :

$$W_{ijk}(t+1) = \begin{cases} W_{ijk}(t) + \alpha(t)[X_k(t) - W_{ijk}(t)] & \text{pour } i,j \in N(t) \\ W_{ijk}(t) & \text{pour } i,j \notin N(t) \end{cases}$$

Où :

$\alpha(t)$ est le gain d'apprentissage, $0 \leq \alpha(t) \leq 1$.

$N(t)$ l'ensemble des neurones gagnants.

A chaque nouvelle itération correspondant à une nouvelle image, on réduit le facteur 'n' et le gain α . Lorsque ces deux paramètres vont tendre vers zéro, on peut admettre que la phase d'apprentissage des échos du sol est terminée. Ainsi, on obtient le bruit (échos du sol) moyen du site étudié (Figure 4.10) et (Figure 4.11).

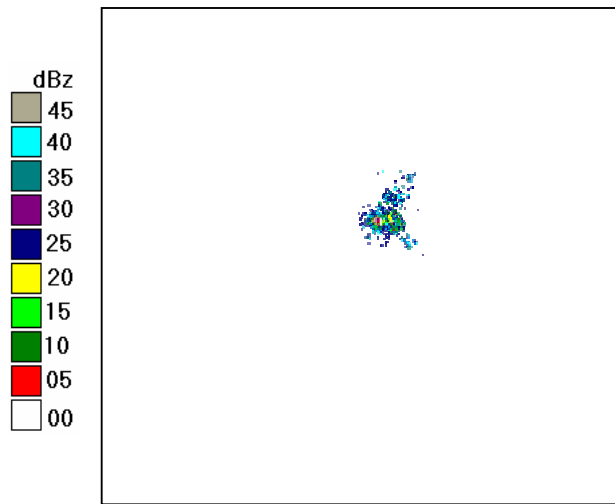


Fig. 4.10 : Bruit moyen des échos du sol obtenu après la phase d'apprentissage du site de 'Bordeaux'

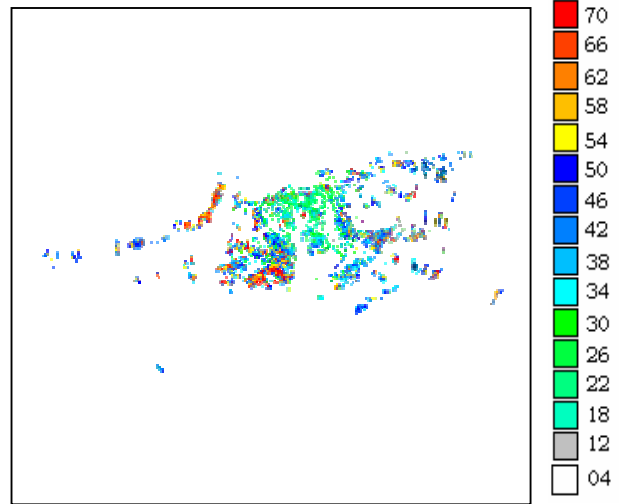


Fig. 4.11: Bruit moyen des échos du sol obtenu après la phase d'apprentissage du site de 'setif'

b. Apprentissage de la forme des nuages

Quant à la reconnaissance de la forme du nuage, son apprentissage se fait comme suit : On ouvre autour de chaque neurone de l'image d'entrée, un voisinage de taille 1 (figure 4.12) ; on calcule la distance euclidienne entre le neurone central et tous les neurones qui l'entourent. Les résultats de ce calcul seront moyennés et attribués à ce neurone central, et ceci jusqu'à atteindre la limite de la carte. Ainsi, on obtient une matrice 'distances euclidiennes' qui caractérise les neurones des cellules nuageuses élémentaires. Ces dernières se distinguent par des valeurs proches de zéro des éléments de cette matrice (figure.13).

- Voisinage d'ordre '0'
- Voisinage d'ordre '1'
- - - - Voisinage d'ordre '2'

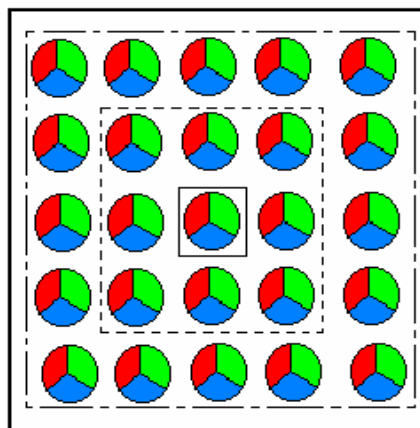


Fig. 4.12: Notion de voisinage

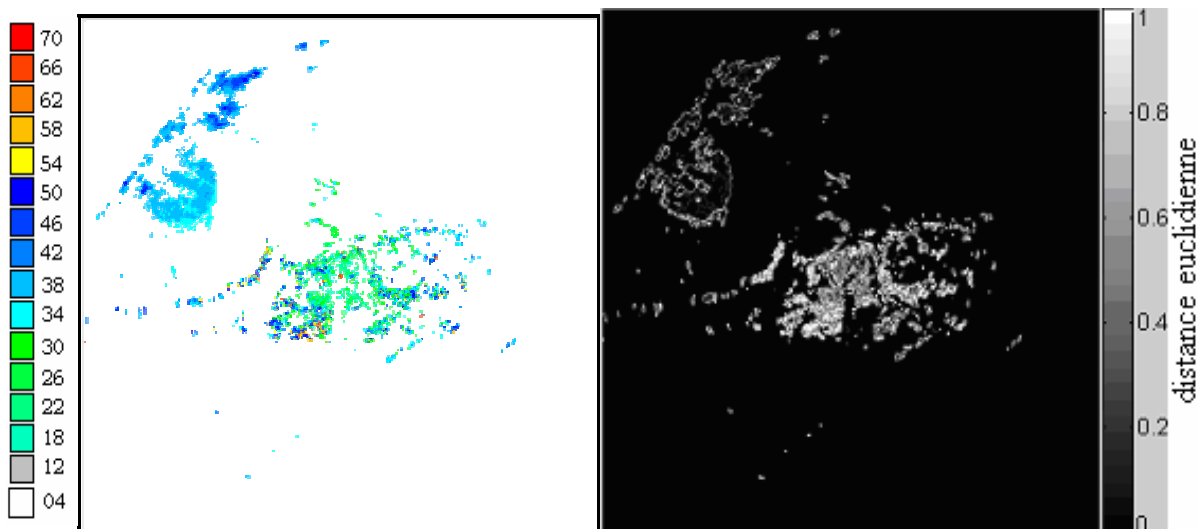


Fig. 4.13: Image radar du site de sétif

Fig. 4.14 : Représentation des éléments de la matrice distance euclidienne pour l'apprentissage de la forme des nuages

Ainsi, on pourra choisir un seuil d'homogénéité (seuil de mise à jour) qui nous permettra de distinguer les neurones qui forment les cellules nuageuses de ceux qui sont isolés ou qui forment les échos fixes ou les échos A.P. Les poids des neurones qui forment les cellules nuageuses seront mis à jour en leur affectant de très grandes valeurs pour pouvoir différencier leur classe de celle des échos du sol. Cette matrice permet de localiser les cellules élémentaires qui forment les nuages.

6.2.3.2 La phase de reconnaissance

Cette phase consiste à identifier les nuages des échos fixes et des échos A.P à partir des critères suivants:

- La ressemblance entre l'image à traiter et l'image des échos du sol obtenue à la phase d'apprentissage.
- L'homogénéité du nuage. Pour ce type d'échos, les pixels se présentent sous une couleur fixe, ou qui diffère légèrement d'une zone à une autre. Dans ce cas, on dit que l'image n'est pas pixellisée.

Ces deux points se traduisent au niveau du programme de la façon suivante :

A la présentation de l'image à traiter, on ouvre autour de chaque neurone, un voisinage de taille très réduite (1 par exemple). Ensuite, on calcule la distance euclidienne entre chaque neurone de ce voisinage et son neurone correspondant (le même rang) dans l'image des échos du sol, obtenue dans la phase d'apprentissage. La distance euclidienne minimale de ce voisinage sera attribuée au neurone central autour duquel le voisinage a été ouvert. Une fois la matrice des distances euclidiennes est obtenue, on choisit un seuil de ressemblance (seuil d'étiquetage) qui nous permettra de localiser les échos fixes dans l'image à traiter.

La figure 4.15 présente cette matrice, obtenue à partir de l'image de la figure 4.13. On constate que les pixels représentant les échos du sol ont une valeur proche du zéro, tandis que ceux qui caractérisent les nuages ont une valeur proche ou égale à 1

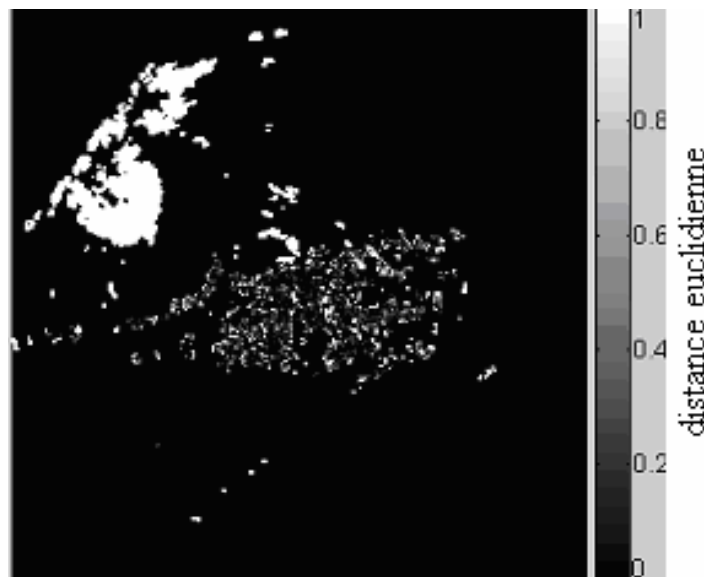


Fig. 4.15 : Représentation des éléments de la matrice distance euclidienne pour la reconnaissance des échos du sol.

Pour le deuxième point, nous restituons la matrice obtenue à la phase d'apprentissage de la forme des nuages. On ouvre autour de chaque neurone de cette matrice, un voisinage de taille relativement grande (d'ordre 4) et on calcule la moyenne de toutes les normes des poids des neurones qui forment ce voisinage. Le résultat de ce calcul sera attribué au neurone central de ce même voisinage. Ainsi, on peut déceler les masses nuageuses et récupérer les neurones parasites prisonniers de ces masses, dotés d'une réflectivité autre que celle des nuages (figure 4.16). Ce calcul nous donnera une nouvelle matrice de distances euclidiennes qui nous renseigne selon ce deuxième critère sur l'emplacement des nuages par rapport aux échos du sol et aux échos A.P.

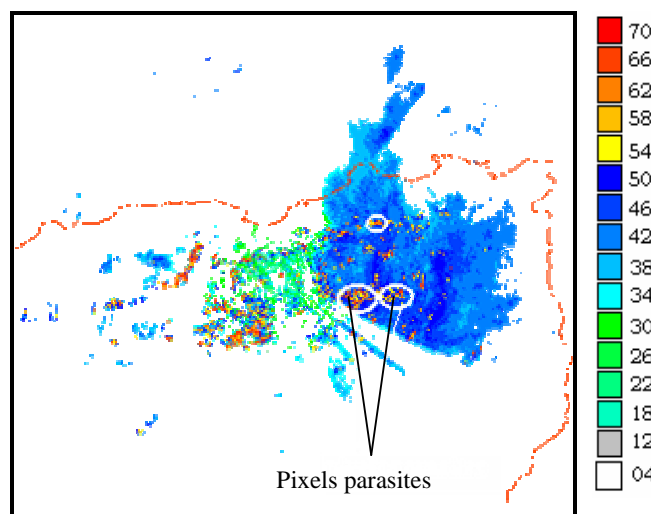


Fig. 4.16: Contamination des nuages par les échos du sol

A ce stade de traitement, nous disposons de deux matrices qui identifient de deux façons légèrement différentes les nuages. Pour tenir compte des deux critères énoncés, nous définissons une nouvelle matrice dont les éléments sont obtenus en calculant la moyenne géométrique des éléments des deux matrices précédentes. Ensuite, nous choisissons un seuil de séparation ou seuil de reconnaissance qui nous permettra de filtrer les nuages.

6.4 Résultats du filtrage

Pour tester l'efficacité de notre algorithme, nous avons considéré plus de trois cents images pour Sétif et deux cents pour Bordeaux. Plusieurs configurations de précipitations ont été considérées. Nous avons traité des images composées d'échos de précipitations se trouvant au dessus des échos du sol et masquant complètement ces derniers, des images constituées que d'échos A.P, des images où les échos de précipitations sont mélangés aux échos du sol et des images où on distingue les échos du sol des échos de précipitations.

6.4.1. Etude du site de Sétif

Les images du site de Sétif sont principalement composées d'échos de précipitation et d'échos fixes. Pour cela, nous exposons les différents cas envisageables, qui sont :

a. les échos fixes séparés des échos de précipitations

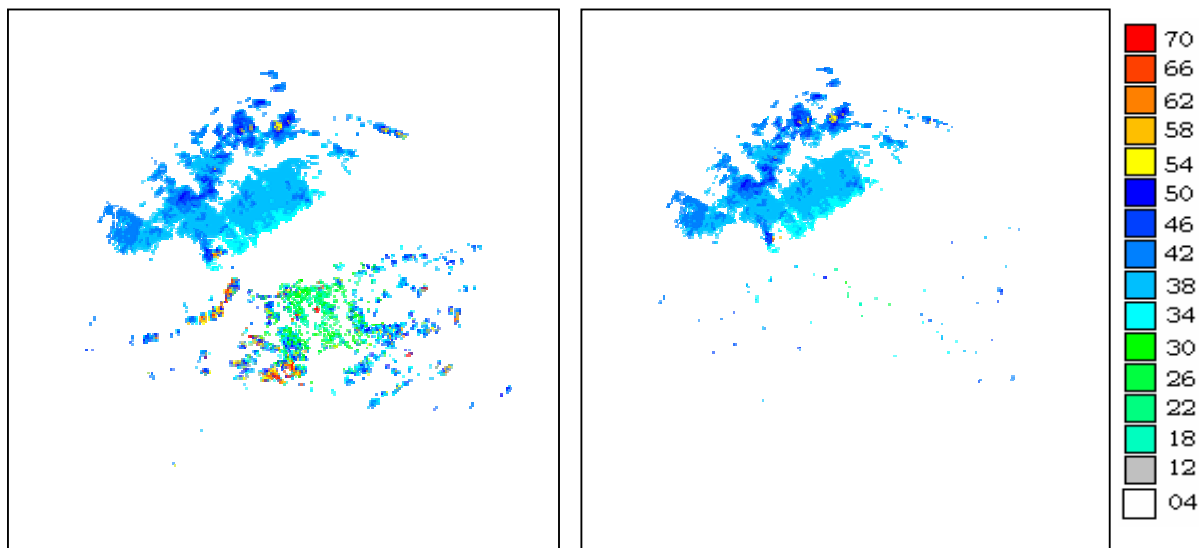


Fig. 4.17 : Image radar du site de Sétif avant filtrage

Fig. 4.18: Image radar du site de Sétif après filtrage

Estimation du taux de filtrage

L'estimation du taux de filtrage, revient à déterminer le taux de préservation des échos de précipitations et le taux d'élimination des échos fixes. Pour ce faire, on calcule le rapport de la surface occupé par les échos fixes avant filtrage sur celle occupé après le filtrage, et de même pour les échos de précipitations.

Le traitement de l'image de la figure 4.17 a donné les résultats suivants :

Les échos de précipitations sont préservés à 98.51 %

Les échos fixes sont éliminés à 96.43 %

b. Les échos de précipitations au dessus des échos fixes

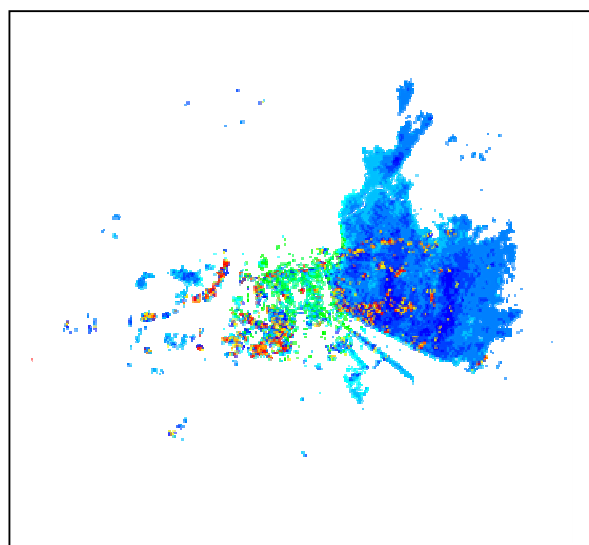


Fig. 4.19 : Image radar du site de Sétif avant filtrage

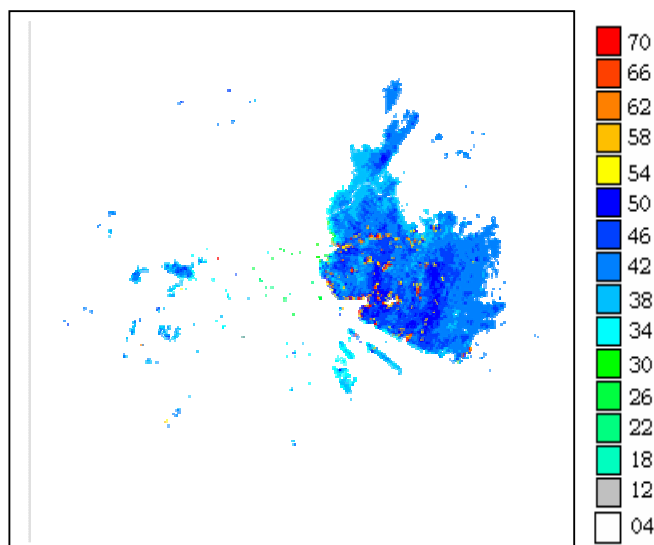


Fig. 4.20 : Image radar du site de Sétif après filtrage

Dans ce cas de figure, nous ne pouvons pas estimer le taux de reconnaissance des précipitations et celui de rejection des échos parasites. Pour tester la puissance de notre approche, nous avons procédé à l’animation des images. On constate que la majorité des échos parasites ont été supprimés.

6.4.2. Etude du site de Bordeaux

Comme pour le site de Sétif, nous avons considéré les configurations suivantes, à savoir

a. Les échos de précipitation séparés des échos fixes

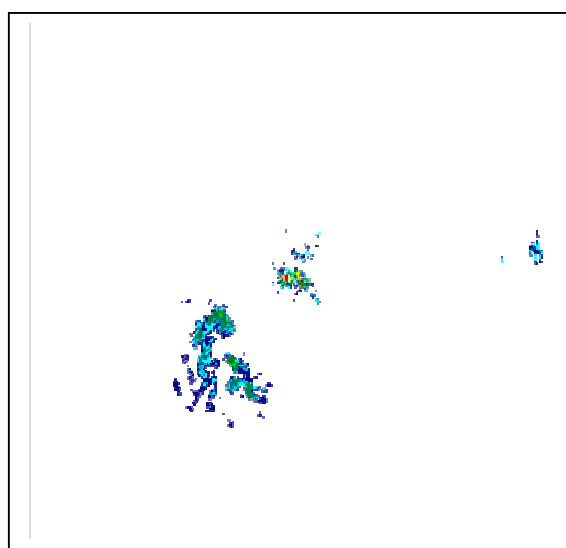


Fig. 4.21 : Image radar du site de Bordeaux avant filtrage

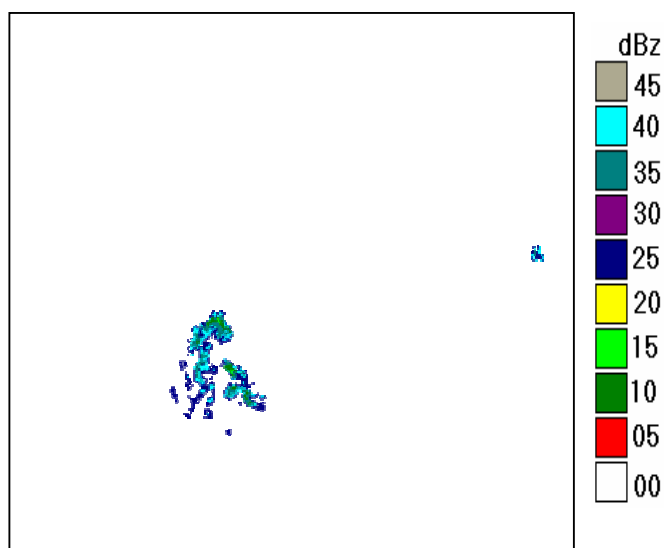


Fig. 4.22 : Image radar du site de Bordeaux après filtrage

Les échos de précipitations sont préservés à 98.48 %

Les échos fixes sont éliminés à 100 %

b. Les échos de précipitation en présence des échos fixes et des échos A.P

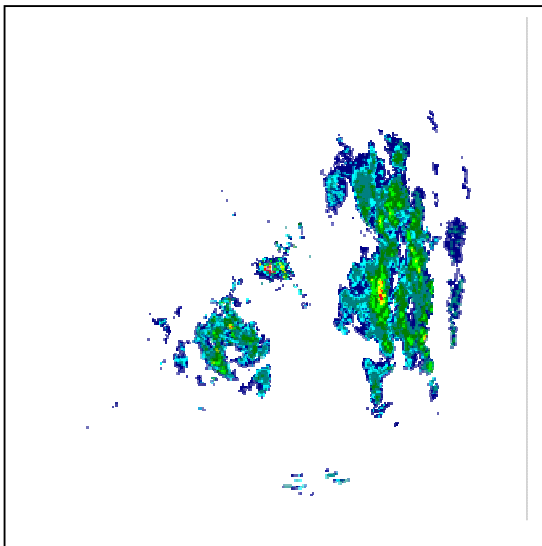


Fig. 4.23 : Image radar du site de Bordeaux avant filtrage

Les échos de précipitations sont préservés à 98.56 %

Les échos fixes sont éliminés à 93.12 %

Les échos A.P sont éliminés à 80.18 %

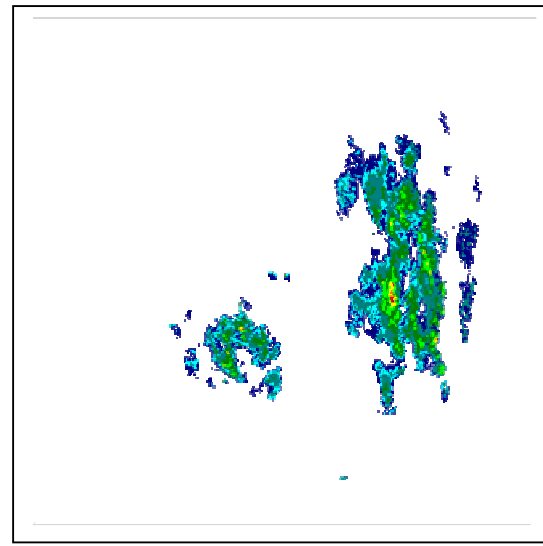
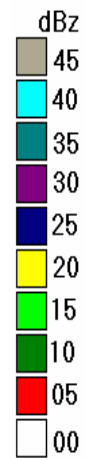


Fig. 4.24 : Image radar du site de Bordeaux après filtrage



c. Les échos fixes et les échos A.P

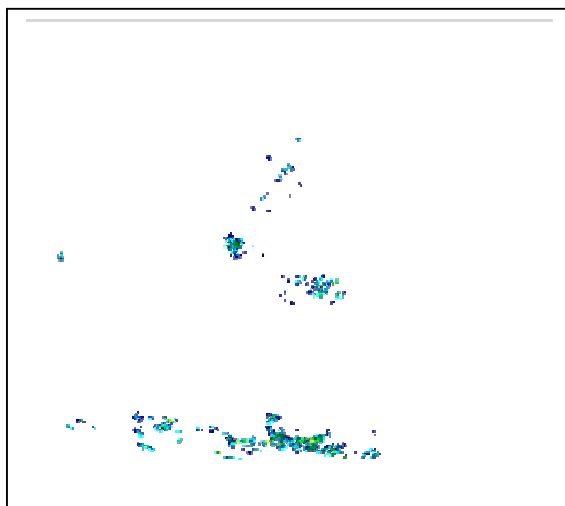


Fig. 4.25 : Image radar du site de Bordeaux avant filtrage

Les échos fixes sont éliminés à 100 %

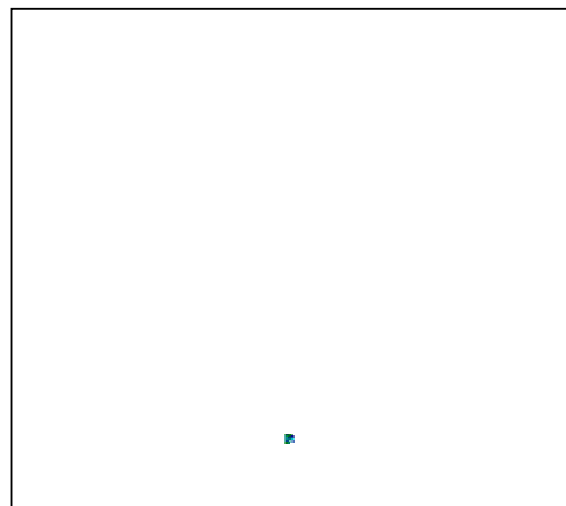
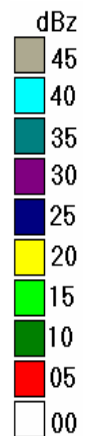


Fig. 4.26 : Image radar du site de Bordeaux après filtrage



Les échos A.P sont éliminés à 96.52 %

d. Les échos de précipitations couvrent les échos fixes

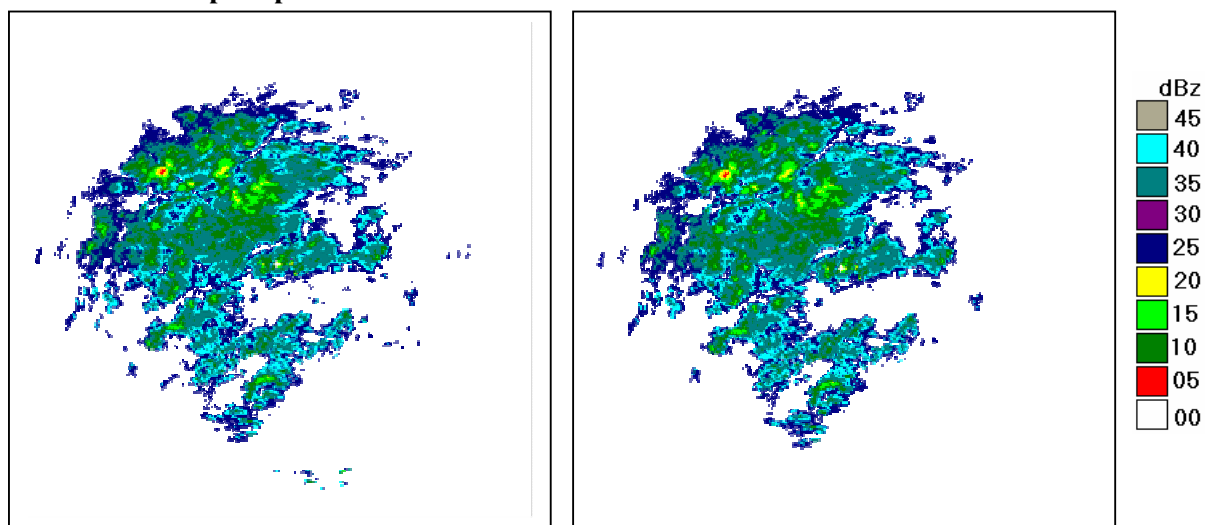


Fig. 4.27 : Image radar du site de Bordeaux avant filtrage

Fig. 4.27: Image radar du site de Bordeaux après filtrage

Les échos de précipitations sont préservés à 99.79%

Les échos A.P sont éliminés à 100 %

7. Etude comparative entre les différentes méthodes d'élimination d'échos du sol

Plusieurs méthodes de classification des échos radar et de suppression des échos parasites provenant de la surface terrestre ont été développées au laboratoire traitement d'Images et Rayonnement. Il s'agit de l'approche texturale et la technique de masquage (Sadouki, 2003 ; Raaf, 2002).

La méthode basée sur l'étude des propriétés texturale des images radar consiste à caractériser la distribution spatiale des éléments d'une surface donnée dans une image. En imagerie, elle peut être définie par les liens spatiaux que possèdent des niveaux de gris voisins qui contribuent à l'apparence globale de l'image (Sadouki, 2003). Pour identifier les échos radar, c'est à dire éliminer les échos du sol et préserver les échos de précipitations, quatre approches texturales ont été utilisées. Il s'agit des méthodes des histogrammes des niveaux de gris, des histogrammes de la somme et la différence des niveaux de gris, des matrices de cooccurrence et de l'approche de Peckinpaugh. Les résultats obtenus montrent que l'approche texturale permet de classer les échos radar sans ambiguïté. Les quatre approches permettent d'éliminer plus de 90% des échos en provenance de la surface terrestre et de préserver plus

de 94% des échos de pluie. Elles sont efficaces dans le traitement des images radar aussi bien pour les échos fixes que pour les anaprops. Ces méthodes donnent des résultats analogues pour divers paramètres discriminants. Les paramètres statistiques choisis comme facteurs discriminant entre les échos du sol et les échos de précipitations sont l'énergie pour l'approche des histogrammes de niveaux de gris, l'énergie et l'homogénéité locale pour l'approche d'Unser, l'homogénéité locale pour la méthode de Peckinpaugh et l'énergie et l'homogénéité locale pour les matrices de cooccurrences. La combinaison de ces facteurs avec les autres paramètres texturaux n'améliore guère la qualité du filtrage des échos de pluie. L'approche des histogrammes des niveaux de gris paraît plus adaptée à l'élimination des échos du sol à cause des résultats satisfaisants de filtrage obtenus et de sa simplicité d'implémentation qui demeure le point fort de cette méthode. Il est intéressant de noter que le même seuil de séparation entre les deux types d'échos a été trouvé pour trois sites différents à savoir les sites de Setif, Bordeaux et Dakar. De ce fait, les conditions de filtrage entre les échos du sol et les échos de précipitations sont indépendantes des différents climats prévalant dans les sites étudiés, qui sont océanique, continental et sahélien. Par conséquent, cette méthode peut être qualifiée d'universelle et facile à l'adapter à n'importe quel site à étudier. Le temps de traitement des images est de l'ordre d'une minute

La méthode de masquage est développée uniquement pour l'élimination des échos fixes. Elle nécessite au préalable la création du masque à partir d'images prises en temps clair, pour ensuite détecter et masquer les échos fixes (Raaf, 2002). Pour ce faire, une base de données de 1100 images en temps clair obtenues à Sétif, a été constituée après un tri minutieux de 140 200 images prise durant la période 1996-1999. Le principe de l'algorithme créé pour réaliser ce masque, est de balayer les 1100 images pixel par pixel, et de calculer la fréquence de répétition des couleurs de chacun des pixels et de conserver ce type d'informations dans des cases mémoire. Ensuite, un pointeur prélève le niveau de gris le plus fréquent en allant du 1^{er} au 262144^{ème} pixel. Une image est alors reconstituée à partir de la couleur la plus fréquente pour chaque pixel.

Après avoir élaboré le masque, ce dernier a été appliqué à la suppression des échos fixes, et ceci à l'aide d'un programme qui réalise la comparaison du pixel de l'image à étudier avec un intervalle variant autour de la valeur la plus probable du masque. La technique consiste à comparer les pixels de l'image à étudier et les pixels du masque. Cette méthode permet d'éliminer les échos fixes avec un taux ne dépassant pas 80%. Les échos dus aux anaprops ou aux variations saisonnières des niveaux de gris, se présentent sous forme de

grains où ils ont l'aspect de résidus de surface. Ces derniers ont pu être éliminés à l'aide de la fonction « medfilt2 » du logiciel MATLAB. Cependant, l'application du filtre médian peut dans certains cas réduire ou éliminer carrément certaines cellules nuageuses isolées. Globalement, cette technique peut atteindre un taux d'élimination des échos en provenance de la surface terrestre avoisinant 85% et peut conserver les surfaces des précipitations à plus de 84%. Cette méthode s'illustre par sa simplicité mais ne peut être appliquée aux régions où la propagation anormale est fréquente.

A partir de cette étude comparative on peut déduire que la méthode des réseaux de neurones donne des résultats meilleurs de point de vue filtrage des échos fixes et les échos A.P. Cependant, l'adaptation aux différents sites, nécessite chaque fois un apprentissage des différents échos. La méthode texturale donne des résultats légèrement inférieurs du point de vue filtrage des échos parasites et préservation des échos de précipitations. A ceux obtenus par les réseaux de neurones mais elle semble universelle car elle possède le même seuil de séparation entre les différents types d'échos. En effet, on garde le même seuil de séparation quelque soit le site étudié. La méthode de masquage est simple à appliquer et donne des résultats satisfaisants. Cependant, elle reste limitée, car son application se réduit à des sites où la propagation guidée est quasiment absente.

8. Conclusion

D'après les résultats présentés ci-dessus, nous pouvons conclure que la méthode de Kohonen donne un excellent résultat du filtrage, et ceci grâce à l'apprentissage de la forme des échos fixes et l'utilisation des critères discriminant qui ont permis de renforcer la distinction entre les différents types d'échos à savoir l'homogénéité des échos de précipitations et la pixellisation des échos A.P. On trouve que le taux de préservation des échos de précipitations varie autour de 98.5% pour Sétif, et entre 98.5% et 99% pour Bordeaux, et ceci suivant la disposition de ces échos par rapport aux deux autres types d'échos. En outre les échos fixes sont éliminés avec un taux de plus de 96% pour Sétif et pouvant atteindre 100% pour le site de Bordeaux. Pour ce qui est du traitement des échos A.P qui se manifestent surtout pour le site Bordeaux, nous avons montré que l'approche par les cartes auto-organisatrices de Kohonen permet de les éliminer avec un taux très appréciable aussi bien lorsqu'ils sont mélangés aux échos fixes ou bien en présence des échos de précipitations.

Conclusion générale

Un système automatique pour la détection et l'élimination des échos en provenance de la surface terrestre a été mis au point. Il est basé sur les cartes auto-organisatrices de Kohonen et s'adapte sans grande difficulté à tout site radar. Les résultats obtenus à travers les images collectées à Bordeaux (France) et Sétif (Algérie) sont très satisfaisants et montrent que la technique développée dans cette étude peut être opérationnelle pour les deux radars implantés dans ces régions. En effet, les échos du sol sont éliminés avec un taux dépassant 96 % pour Sétif alors qu'ils sont pratiquement éliminés pour Bordeaux (taux avoisinant 100 %). Cette légère différence peut s'expliquer par le fait qu'autour du radar de Sétif, on trouve beaucoup de reliefs montagneux à l'exemple des montagnes du Djurdjura, des montes de Bibans et des Babors, alors que la région de Bordeaux est plutôt plate. En outre, le taux de préservation des échos de précipitation dépasse 98 % et s'avère très intéressant. L'attraction majeure de l'approche des cartes auto-organisatrices de Kohonen réside dans le fait qu'elle repose sur un apprentissage non supervisé, alors que celles proposées dans la littérature sont basés sur un apprentissage supervisé, et que les programmes développés sont simple à mettre au point. En outre, les algorithmes peuvent jouer le rôle de système automatique de traitement en temps réel. En effet, les images sont collectées toutes les cinq minutes ou plus alors que le temps de traitement ne dépasse pas une (01) minute.

Une étude comparative avec les autres méthodes développés au laboratoire telles que la texture et le masquage montre que les résultats de classification par les cartes auto-organisatrices de Kohonen sont plus intéressants. Cependant la phase d'apprentissage est indispensable chaque fois qu'on change de site alors que le critère d'identification par l'approche texturale a un seuil universel.

CARACTERISATION DES NUAGES

1. Etages nuageux

On peut trouver des nuages à différents niveaux de la troposphère. Pour cela, cette dernière est divisée en trois étages appelés respectivement :

- ▶ Étage inférieur (noté C_L pour low)
- ▶ Étage moyen (noté C_M pour middle)
- ▶ Étage supérieur (noté C_H pour high)

Les limites verticales des étages nuageux se chevauchent et de plus, dépendent de la latitude des régions concernées. La table A-1 donne les limites approximatives des étages nuageux.

ETAGES	REGIONS POLAIRES	REGIONS TEMPEREES	REGIONS TROPICALES
Inférieur	0 à 2 km	0 à 2 km	0 à 2 km
Moyen	de 2 à 4 km	de 2 à 7 km	de 2 à 8 km
Supérieur	de 3 à 8 km	de 5 à 13 km	de 6 à 18 km

Table A-1 : Limites approximatives des étages nuageux

2. Classification internationale des nuages

Les nuages ont été classés en 10 genres. Chaque nuage ne peut appartenir qu'à un seul type. En général, on le reconnaît d'après sa forme (nuage cumuliforme ou stratiforme), sa taille, l'étage auquel il appartient, et aussi grâce à certains phénomènes qui lui sont associés (exemple l'orage est toujours dû à un cumulonimbus).

La table A-2 résume les 10 genres nuageux, leur abréviation, l'étage nuageux auquel appartient le genre ainsi que le caractère stable ou instable du nuage et sa constitution physique.

GENRE	ABREVIATION	ETAGE	STABILITE	CONSTITUTION PHYSIQUE
Cirrus	Ci	sup	stable	glace
Cirrocumulus	Cc	sup	instable	glace
Cirrostratus	Cs	sup	stable	glace
Alto cumulus	Ac	moyen	instable	eau + glace
Altostratus	As	moyen	stable	eau + glace
Nimbostratus	Ns	inf/sup	stable	eau + glace
Stratocumulus	Sc	inf	(1)	eau ou eau + glace
Stratus	St	inf	stable	eau ou eau + glace
Cumulus	Cu	inf/moy	instable	eau (base) glace (som)
Cumulonimbus	Cb	inf/sup	instable	eau (base) glace (som)

Table A-2 : Caractérisation des dix genres de nuages (les stratocumulus peuvent être considérés comme stable ou instable)

L'analyse de la table A-2 nous permet de tirer quelques constatations :

- ▶ La racine « cirr » est reprise pour tous les nuages qui n'appartiennent qu'à l'étage supérieur.
- ▶ Il en est de même avec les nuages qui n'appartiennent qu'à l'étage moyen avec la racine « alto ».
- ▶ Certains nuages ont une extension verticale qui les fait empiéter sur plusieurs étages : le cumulus qui s'étend de l'étage inférieur à l'étage moyen et le nimbostratus et le cumulonimbus qui s'étendent de l'étage inférieur à l'étage supérieur.

3. Description des dix genres de nuages

3.1. Stratus

Les stratus se présentent sous forme d'une couche nuageuse grise, dense, uniforme donnant lieu à du brouillard quand sa base atteint le sol. Il est constitué de gouttelettes d'eau (parfois de particules de glace).

Précipitations associées : bruine ou neige en grains.

3.2. Cumulus

3.2.1 Cumulus Congestus

Les Cumulus Congestus se caractérisent par un développement vertical important, dont l'aspect bouillonnant révèle de puissants mouvements verticaux. Ils sont constitués de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace (si la partie supérieure du nuage est très $< 0^{\circ}\text{C}$).
Précipitations associées : averses de pluie, neige ou neige roulée.

3.2.2 Cumulus bumilis

Les Cumulus bumilis sont des nuages séparés, avec des contours bien délimités, une base horizontale avec faible développement vertical. Ils sont appelés des nuages de beau temps, apparaissant le matin et disparaissant le soir. Ils sont constitués de gouttelettes d'eau.
Pas de précipitations associées.

3.3. Nimbostratus

Les Nimbostratus apparaissent sous forme d'une couche nuageuse grise et sombre dont l'aspect est rendu flou par des chutes de pluie ou de neige atteignant le sol. L'épaisseur de cette couche est partout suffisante pour masquer complètement le soleil. Ce nuage est constitué de gouttelettes d'eau, de cristaux de glace ou de flocons de neige.
Précipitations associées : pluie, neige ou granules de glace.

3.4. Altostratus

En présence d'Altostratus, on observe une nappe ou couche nuageuse grisâtre ou bleuâtre couvrant totalement ou partiellement le ciel, laissant voir le soleil comme à travers un verre dépoli. Constitué de gouttelettes d'eau (parfois surfondues), de cristaux de glace ou de neige, il est à l'origine de chutes de pluie, de neige ou de granules de glace.

3.5. Altopumulus

Ils sont blancs ou gris et composés d'éléments réguliers ayant une largeur apparente comprise entre 1 et 5 degrés. Ils sont constitués de gouttelettes d'eau parfois accompagnées de cristaux de glace.

3.6. Stratopumulus

De couleur blanche, la plupart des éléments (soudés ou non) composant les stratocumulus ont une largeur apparente supérieur à 5 degrés. Ils sont constitués de gouttelettes d'eau (parfois accompagnées de neige roulée ou de flocons de neige). Précipitations associées : pluie ou neige faible ou neige roulée.

3.7. Cirrostratus

Ils apparaissent sous un voile élevé, transparent et blanchâtre, couvrant partiellement ou totalement le ciel. Il est constitué de cristaux de glace et donne lieu généralement à des phénomènes de halo.

Pas de précipitations associées.

3.8. Cirrocumulus

Les cirrocumulus sont blancs dont la plupart des éléments ont une largeur apparente inférieure à 1 degré. D'aspect ondulé ou « moutonné », ils sont constitués de cristaux de glace et parfois d'eau fortement surfondue (eau liquide à température négative).

Pas de précipitations associées.

3.9. Cirrus

Ce sont des nuages élevés en forme de filaments blancs, de bandes étroites, de virgules ou crochets, composés de cristaux de glace dispersés. Pas de précipitations associées.

3.10. Cumulonimbus

Les cumulonimbus se distinguent par leur développement vertical et leur puissance. La partie supérieure lisse ou fibreuse s'étale en forme d'enclume ou de vaste panache. La partie inférieure apparaît très sombre du fait de la grande extension verticale du nuage. Précipitations associées : averses de pluie, neige, neige roulée, grêle ou grésil. Les orages sont toujours provoqués par ce genre de nuage.

Techniques d'élimination des échos du sol

1. Les échos radar

En général, le radar travaille dans un environnement comportant divers objets fixes ou se déplaçant à différentes vitesses. Lorsque les ondes issues du radar sont rétro-diffusées par de tels obstacles, elles forment alors un ensemble d'échos indésirables qui gênent la détection des cibles que l'on voudrait observer. Ainsi, la présence d'échos en provenance du sol mélangés aux échos météorologiques, rend difficile les mesures hydrologiques à l'aide d'un radar. En fait, tous ces échos perturbateurs forment, par définition, le clutter.

2. Les échos de la surface terrestre

Les échos provenant de la surface terrestre limitent les performances quelle que soit l'application envisagée. Ils peuvent être répartis en deux catégories, à savoir : les échos fixes du sol et les échos mobiles.

2.1 Les échos fixes du sol

Les échos fixes du sol sont observés principalement autour du radar. Ainsi, les reliefs, les constructions, les routes, les pylônes sont des exemples de cibles qui peuvent induire des ambiguïtés lors de l'observation des précipitations. Les échos du sol existant autour du radar sont permanents et leurs positions sont bien connues.

2.2 Les échos mobiles

Les échos mobiles sont souvent de faible réflectivité. Ils sont dus aux plantes, aux feuilles des arbres et au mouvement des vagues. Il existe aussi des échos lentement mobiles dus aux anomalies de propagation. Etant donné que ces échos sont transmis par guidage atmosphérique, ils sont très intenses. Leurs positions et leurs intensités dépendent des variations météorologiques [Haddad, 2000]. En particulier, lorsqu'une caustique s'est formée dans l'atmosphère et que les ondes radar sont émises sous incidence rasante, leur rétro-diffusion par le relief terrestre se traduit par des ondes qui retournent vers le radar en effectuant des bonds successifs entre la caustique et la surface terrestre. Les réflexions graduelles dans la caustique dépendent essentiellement de l'angle d'émission des ondes par le radar et des conditions météorologiques qui prévalent dans l'atmosphère. En pratique, cet angle est faible et ne dépasse pas 5° . Etant donné que les échos du sol dus à la propagation

anormale résultent de la rétro - diffusion par le relief terrestre, de tels échos sont très intenses. Mais, comme ils sont transmis par guidage atmosphérique, ils sont localisés loin du radar, généralement au-delà de la zone de visibilité directe. Cependant, ces échos ne sont pas fixes. En effet, le changement des conditions météorologiques produit des fluctuations de l'indice de réfraction atmosphérique dans la caustique et, par suite, des variations de courbure dans celle - ci. Tout ceci se traduit par des fluctuations de la position des anaprops.

3. Techniques d'élimination des échos du sol

Les échos du sol causent beaucoup d'ennuis aux opérateurs radar en induisant des erreurs dans l'identification et l'estimation des précipitations. Divers méthodes d'élimination des échos fixes sont proposées dans la littérature [Doviak et Zrníc, 1993 ; Hamuzu et Wakabayashi, 1991 ; Moszkowicz *et al* , 1994 ; Tatehira et Shimizu, 1978]. Les techniques les plus couramment utilisées sont :

- Filtrage Doppler ;
- Filtrage en peigne ;
- Filtrage par polarisation ;
- Circuits MTI ;
- Filtrage par seuillage ;
- Méthode de masquage ;
- Méthodes statistiques ;

3.1 Filtrage Doppler

Ce type de filtrage est très employé dans les radars cohérents [Doviak et Zrníc, 1993]. Il est assuré par un filtre passe-haut à flanc raide et est basé sur la séparation de deux cibles par comparaison de leur spectre Doppler. Le rôle de ce filtre est d'éliminer les échos fixes, qui sont intenses et dont la position est fixe, en supprimant la composante Doppler de fréquence nulle ou proche de 0 Hz . Il est conçu de façon à ne conserver que les échos radar en mouvement. C'est le cas des échos de pluie qui sont caractérisés par un spectre Doppler très élargi et qui sont animés d'une vitesse non nulle. Le filtrage de la vitesse est effectué en procédant d'abord à une conversion analogique – numérique du signal vidéo issu du radar.

Ensuite, ce signal est transmis à un filtre qui est habituellement du type cosinus, cosinus carré, Tchebycheff ou Hamming.

Le filtre Doppler est bien adapté à la détection des pluies intenses ou quand on a affaire à des vents modérés soufflant à moins de 30 km/h. Pour des pluies fines, le spectre des échos de précipitations risque de se confondre avec celui des échos fixes. Il devient alors difficile d'éliminer les échos fixes sans affaiblir les échos de précipitations. Pour rendre le filtrage Doppler plus efficace, on peut alors utiliser soit des filtres à réponse impulsionnelle finie, soit des filtres à réponse impulsionnelle infinie [Keeler *et al.* , 1990]. Dans le cas de radars non cohérents, on fait appel au filtrage en peigne.

3.2 Filtrage en peigne

A hautes fréquences, le signal radar, à l'émission, est un train de sinusoides de fréquence f_0 , modulé en amplitude par des impulsions rectangulaires de durée τ . L'intervalle de fréquence qui sépare deux raies successives est égal à f_r et l'amplitude de ces raies est donnée par :

$$X = X_0 \quad \text{pour } n=0$$

$$X = \frac{2X_0 \left| \sin \frac{n\pi\tau}{T_r} \right|}{\frac{n\pi\tau}{T_r}} \quad \text{pour } n = 1, \dots, n$$

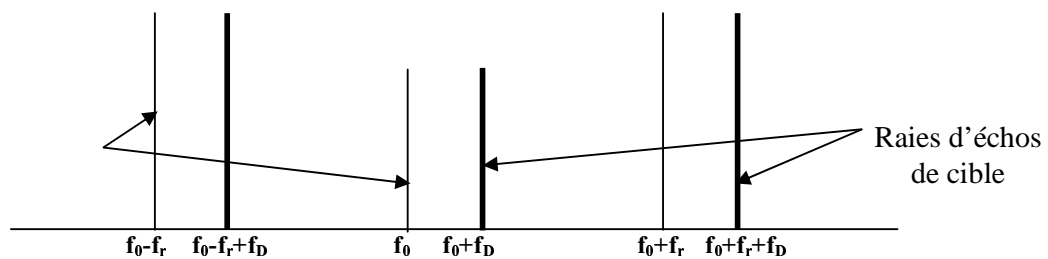


Fig. B-1: Décalage Doppler du spectre pour une cible en mouvement.

Les raies spectrales des échos fixes apparaissent aux mêmes fréquences que celles du spectre à l'émission c'est à dire aux fréquences $f_0 \pm n f_r$ (avec $n = 0, 1, 2, \dots$). Lorsque le signal est rétro-diffusé par une cible en mouvement, tout le spectre subit un décalage de fréquence « f_D » par rapport aux raies à l'émission ; les raies de ce spectre sont alors situées aux fréquences $f_0 + f_D \pm n f_r$. Pour éliminer les échos fixes tout en gardant les échos de pluie, il suffit de supprimer toutes les composantes de fréquences $f_0 \pm n f_r$ à l'aide d'un filtre en peigne inséré dans l'étage FI du récepteur radar [Carpentier, 1981].

3.3 Filtrage par polarisation

Cette méthode consiste à mesurer la réflectivité de cibles pour différentes polarisations du champ électromagnétique [Hamuzu et Wakabayashi, 1991]. L'intensité des échos issus des cibles atmosphériques varie peu avec la polarisation des ondes radar, vu la forme quasi sphérique des gouttelettes d'eau qui composent les nuages. Par contre, pour la plupart des échos en provenance de la surface terrestre, l'intensité des échos dépend fortement de la polarisation des ondes car la forme des obstacles constituant le relief qui est quelconque. Pour identifier chacun des deux types d'échos, on considère la réflectivité différentielle de la cible. Cette dernière est donnée par l'équation suivante:

$$\eta_{DR} = 10 \text{Log} \left(\frac{P_H}{P_V} \right)$$

où P_H et P_V sont les puissances reçues par un radar et résultant de la rétro-diffusion, par une même cible, d'ondes émises respectivement en polarisation horizontale et en polarisation verticale.

La réflectivité différentielle est pratiquement constante pour les gouttelettes d'eau et elle est très variable pour les échos provenant de la surface terrestre à cause de la forme diversifiée des obstacles. On peut alors se servir de l'influence de la polarisation sur l'intensité des échos radar pour éliminer les échos du sol.

3.4. Circuits MTI

Le principe du procédé MTI (Moving Target Indicator) est de comparer les échos radar obtenus à une période donnée aux échos apparaissant aux périodes suivantes de façon à

supprimer les échos fixes et à conserver ceux dus aux cibles mobiles [Aoyagi, 1983; Skolnik, 1990 ; Giuli *et al*, 1991].

Le schéma de la figure B-2 est celui d'un MTI à simple annulation, placé généralement, soit à la sortie du démodulateur, soit dans la chaîne d'amplification FI. Il se compose essentiellement d'une ligne à retard et d'un circuit soustracteur.

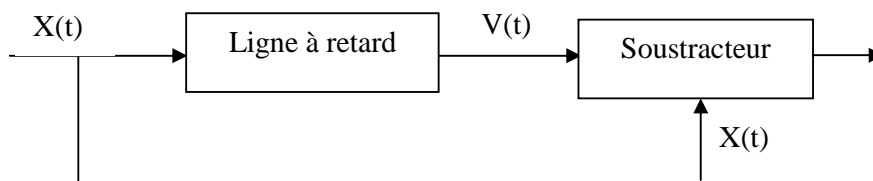


Fig. B-2 : Circuits M.T.I. simple annulation.

Le signal $X(t)$ apparaissant à l'impulsion k est à la fois transmis à l'une des entrées du circuit soustracteur et à l'autre entrée par le biais d'une ligne à retard. Cette dernière déphase le signal $X(t)$ de façon à ce qu'il soit retardé d'un temps égal à une période de répétition T_r . Puis le signal $V(t)$ ainsi retardé est comparé au signal $X(t)$ apparaissant à l'impulsion $k+1$. Après soustraction, les échos fixes sont éliminés car ils apparaissent toujours à la même période T et à une amplitude constante quand on passe d'une impulsion radar à l'autre. Par conséquent, le signal $S(t)$ obtenu à la sortie du soustracteur, ne se compose que des échos relatifs aux cibles mobiles, en général, et des échos atmosphériques en particulier.

Dans le cas où on place un circuit MTI à double annulation, c'est à dire, deux MTI à simple annulation montés en cascade, ceci améliorera l'élimination des échos fixes.

3.5. Filtrage par seuillage

Le clutter peut être éliminé à l'aide d'un seuillage adaptatif en estimant la variance du phénomène [Cole, 1992]. Pour cela, on divise l'espace que scrute le radar en cellules "distance" de même taille. En suite, on représente ces cellules par une matrice, lorsque l'antenne tourne, le signal détecté par le récepteur est stocké numériquement dans l'ordre d'apparition des cellules au cours du balayage et selon la hiérarchie des intervalles de portée. Pour chacune des cellules, la puissance moyenne du clutter et du bruit est évaluée. Un seuil est alors attribué pour chacune des cellule. Lorsque dans une cellule, le signal de réception

dépasse le seuil correspondant, on se trouve en présence d'une cible. La technique ainsi décrite est surtout utilisée pour la détection d'objets volants.

3.6 Méthode de masquage

La méthode consiste à réaliser une image (ou un masque) qui doit être utilisé pour détecter et masquer les échos fixes sur les images radar. Cette image est obtenue en déterminant les niveaux de réflectivité les plus probables, pour chaque pixel, dans des images en temps clair. L'opération de filtrage s'effectue par une comparaison directe des images brute au masque [Raaf., 2002].

3.7. Méthodes statistiques

Les méthodes statistiques sont des techniques de traitement des signaux radar. Elles consistent à échantillonner le signal reçu comportant les échos de précipitations ainsi que les échos de sol et à comparer les différents échantillons [Beguin et Plante, 1998]. Donc, on peut éliminer les échos indésirables en calculant les différences entre les valeurs moyennes et les valeurs maximum des propriétés de signal radar ; on rejette ensuite tous les signaux pour lesquels cette différence est faible. On peut également procéder par analyse de la texture des images. Cette méthode est basée sur les probabilités conditionnelles, les probabilités composées, la corrélation liant plusieurs pixels ou les réseaux de neurones [Pankiewicz, 1998; da Silveira et Hot, 1999; Seltman et Reidl, 1999 ; Grecu et Krajewski; 2000]. On peut par exemple appliquer un filtre qui élimine les pixels faiblement corrélés avec leur voisinage [Gabella *et al.*, 1999].

REFERENCES

- Aoyagi, J., 1983: A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter. *Pap. Meteor. Geophys.*, **33**, 187-243.
- Ashish Ghosh & Sankar K. Pal : Pattern Recognition Letters. *Les publications de The international Association for pattern recognition*, **13**, 307-398.
- Beguín, D., and J. L. Plante, 1998 : *Ground Clutter Suppression Methods*. Advanced Weather Radar System. Inter. Seminar on **COST 75** – Locarno, European communities, Bruxelles, Belgium, 758-769.
- Carpentier, M. H., 1981 : *Elements constitutifs du radar : l'élimination du clutter*. Tome III. Ed. E.N.S.T.A.**
- Cole, H. W., 1992 : *Understanding Radar*. BPS Professionnal book, Oxford.**
- Da Silveira, R. B., and A. R. Holt, 1999: A S-band/C-band comparison of the use of polarisation for clutter classification in weather radar using neural networks. *Proc. Advanced Weather Radar System. Inter. Seminar on COST 75* – Locarno, European Communities, Bruxelles, Belgium, 758-769.
- Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations*. Academic Press. 562 pp.
- Fiore, J.V., R. K. Farnsworth, and G. J. Huffman, 1986 : Quality control of radar rainfall with VISSR data. Preprints, *23d Conf. on Radar Meteorology and Conf. on Cloud Physics and Papers from Joint Sessions*, Snowmass, CO, Amer. Meteor. Soc., JP15-JP18.
- Gabella, M., G. Galli, O. Ghigo, J. Joss, and G. Perona, 1999: Clutter elimination and agreement between hourly precipitation amounts as measured by two radars and network of gauges. *Proc. Advanced Weather Radar System. Inter. Seminar on COST 75* – Locarno, European Communities, Bruxelles, Belgium, 102-113.
- Giuli, D., M. Gharardelli, A. Freni, T. A. Seliga, and K. Aydin, 1991: Rainfall and clutter discrimination by means of dual-linear polarisation radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **8**, 777-789.
- Greco, M., and W. F. Krajewski, 2000: An efficient Methodology for Detection of Anomalous Propagation Echoes in Radar Reflectivity Data Using Neural Networks. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 121-129.
- Haddad, B., A. Adane, F. Mesnard, and H. Sauvageot, 1999 Climatologie des échos du sol en zone cotière. *Les publications de L'Association Internatioanale de Climatologie*, **12**, 237-244.
- Haddad, B., A. Adane, F. Mesnard and H. Sauvageot, 2000: Modelling anomalous propagation using first-two-states Markov Chains. *Atmos. Res.*, **52**, 283-292.
- Haddad, B. ; Adane, A; Sauvageot, H ; Sadouki, L and Naili, R 2004 : Identification of Radar Echoes using the textural properties of gray level histogram. In. Jour. Of Remote Sensing. Sous presse.
- Haddad, B., N. Assous, and L. Sadouki , 2004 Identification du clutter du sol par les réseaux de neurones. *XVII Colloque de l'A.I.C.*, Caen (France).
- Hamuzu, K., and M. Wakabayashi, 1991: *Ground clutter rejection*. Hydrological Applications of Weather Radar, Clukie and Collier, Ed. Ellis Horwood Ltd., 131-142.
- H.Sauvageot, 1982, Radiométéorologie : Télédétection active de l'atmosphère, Ed. Eyrolles, Paris.

- H.W.Cole, 1990, understanding radar, Ed. BSP Professional book, Oxford.
- J.Darricau, 1981, Physique et théorie du radar, tomes I et II, Ed Sodipe, Paris.
- Keeler, R. J., and R. E. Passareli, 1990 : *Signal processing for atmospheric radars*. Radar in Meteorology : Battan memorial and 40th anniversary : Radar Meteorology Conference, 199-229, Ed. atlas, American Meteorological Society, Boston.
- Krajewski, W. F., and B. Vignal, 2001: Evaluation of anomalous propagation echo detection in W-S-R-88 D: a large sample case study. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 807-814.
- Marshall, J. S., and W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteo.*, **5**, 165-166.
- Moszkowicz, S., G. J. Ciach and W. F. Krajewski, 1994: Statistical detection of anomalous**
 Propagation in radar reflectivity patterns. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 1026-1034.
- Nzeukou, A., and H. Sauvageot, 2002: Distribution of rainfall parameters near the coasts of France and Senegal. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 69-82.
- Pamment, J. A., and Conway, B. J., 1998: Objective identification of echoes due to anomalous propagation in weather radar data. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **15**, 98-113.
- Pankiewicz, G. S., 1998: Removal of anomalous radar propagation with a neural network precipitation classifier trained on Meteosat infrared imagery. *Proc. 9th Sat. Met.&Ocean Conf.* Paris, France. 385-388.
- P.Werbos, 1974 "Beyond Regression: New tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences," *Ph.D. thesis*, Dept. of Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, Mass.
- Raaf, 2002 : Application de l'instrumentation radar a la pluviométrie. Thèse de magister, USTHB.
- Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnica, 1998: Polarimetric rainfall estimation in the presence of anomalous propagation . *J. Atmos. Oceanic.Tech.*, **15**, 1320-1330.
- Sadouki, L, 2003 : Etude des propriétés texturales des images Radar en vue d'applications météorologiques. Thèse de magister, USTHB.
- Sauvageot, H., and G. Despau, 1990 : SANAGA : *Un système d'acquisition numérique et de visualisation des données radar pour la validité des estimations satellitaires de précipitations*. *Veille Climatique Satellitaire*, **31**, 51-55.
- Seltman, R. ,and J. Reidl, 1999: Improved clutter treatment within the German radar network: first results. *Proc. Advanced Weather Radar System. Inter. Seminar on COST 75 – Locarno*, European Communities, Bruxelles, Belgium, 267-279.
- Skolnic, M. I., 1990 : *Radar Handbook*. Mc Graw Hill.
- Smith, C. J., 1981 : Spurious echoes observed by the Meteorological Office radar network and methods of reducing their intensity. Meteorological Office Radar Research Laboratory, RSRE Malvern, Research Rep. 27, 62 pp.
- Tatehira, R., and T. Shimizu, 1978 : Intensity measurement of precipitation's echo superposed on Ground clutter, a new automatic technique for ground rejection. *Proc. 18th Radar Meteor.Conf. Amer. Meteo. Soc.*, Boston, 364-369.
- T.Kohonen, 1982, self-organized formation of topologically correct feature maps. Master's thesis.
- T.Kohonen, 1989, self-organization and associative memory .Springer, Berlin, 3rd edition.
- T. Kohonen, september 1990, The self-organizing map. Proceedings of the IEEE, 78(9) : 1464-1480,