

## Département des Sciences de la Terre

### Licence Sciences et Techniques Option : Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

# Suivi des Surfaces enneigées par Télédétection

Réalisé par:

MLLE BOUKHIMA Ouissal

MLLE EZZAROUALI Zahwa

MLLE CHEMAA Khadija

Soutenu Le 20/ 06/ 2023 Devant la commission d'examen composée de:

Pr. EL WAHIDI FARID FSTG Marrakech (Encadrant)

Pr. IBOUH HASSAN FSTG Marrakech (Examineur)

2022/2023

## REMERCIEMENT

Tout d'abord, ce travail ne serait pas riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide de ce grand homme, notre encadrant **Monsieur EL WAHIDI FARID** malgré son emploi du temps surcharge, a toujours été à l'écoute du moindre de nos besoins et pris de temps de nous orienter tout au long de notre travail de fin d'études. On remercie pour ses conseils, sa collaboration, sa disponibilité, ses appuis pendant toute la période de stage, et son encouragement qui nous a aidé à surmonter nos difficultés. Merci monsieur, vos précieux conseils, vos commentaires, et vos critiques ont été très utiles pour élaborer ce travail. Un petit mot de merci avec une grande gratitude qu'on ressent sincèrement envers vos efforts et dévouement.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Ce projet n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille, surtout nos parents qui nous ont toujours encouragé moralement et matériellement, on tient à les remercier.

En fin, merci à toutes les personnes de la faculté des sciences et techniques qui ont participé à notre formation ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Sommaire

REMERCIEMENT .....	
Sommaire.....	
Liste des abréviations .....	
Introduction.....	1
Chapitre1 : La Neige.....	4
INTRODUCTION.....	5
1 NEIGE AU MONDE .....	5
2 La Neige au Maroc.....	7
2.1 Les Facteur des chutes de neige.....	7
2.1.1 Morphométrie du Maroc .....	7
2.1.2 Les caractéristiques du Climat.....	8
2.1.2.1 Régime thermique.....	10
2.1.2.2 Régime Pluviométrique .....	13
2.1.2.2.1 Précipitation sous forme de pluies.....	14
2.1.2.3 Rayonnement global .....	15
2.1.2.4 Dépressions ou flux apportant la neige .....	15
2.2 Les chutes de neige.....	16
2.2.1 Hauteur des chutes.....	16
2.2.2 La qualité de la neige .....	17
2.2.3 Répartition géographique .....	18
2.2.4 Périodicité des chutes.....	18
2.2.5 Altitude des chutes suivant la saison .....	19
3 Changement du climat.....	19
3.1 La Température .....	20
3.2 Les Précipitations .....	22
Chapitre 2: La Télédétection .....	25
4 Les types de résolution en Télédétection.....	26
5 Les domaines d'application.....	27
6 Les données de la Télédétection .....	28
7 Les indices de la Télédétection.....	31
8 Les capteurs de la télédétection .....	34
Chapitre3 : Suivi Les surfaces enneigées par la télédétection.....	40
INTRODUCTION.....	40
9 SUIVI DU COUVERT NIVAL.....	40
9.1 Variabilité spatio-temporelle de l'étendue du manteau neigeux.....	40
9.1 Propriétés physiques de la neige .....	42
9.1.1 Albédo.....	42
9.1.2 Taille de grain.....	42
9.1.3 Température de surface.....	42
9.1.4 Hauteur de neige, équivalent en eau et teneur en eau liquide.....	43
10 – Matrice des données, approches et indices en nivologie .....	44
CONCLUSION .....	49
Références bibliographiques.....	50

## Liste des figures

- Figure 1: Carte Satellite du monde en hiver, avec la couverture de neige partielle. Cette image a été compilé à partir de données acquises par les satellites Landsat 7 et 8 ..... 6
- Figure 2: Carte de classification des régions selon l'altitude ..... 8
- Figure 3: Carte du climat du Maroc selon la classification de Koppen-Geiger 1981-2010..... 10
- Figure 4: a) Carte de la Température minimale moyenne annuelle de l'an 2022. b) carte de la température minimale moyenne annuelle de 2022 par rapport à la normale climatologique 1981-2010..... 11
- Figure 5: Diagramme de la température moyenne mensuelle dans les trois sommets : A/ Jbel Toubkal, B/ Jbel Mgoun, C/ Jbel Ayyachi ..... 12
- Figure 6: Carte de Cumul pluviométrique annuelle de l'an 2021..... 14
- Figure 7: a) Carte de moyenne annuelle du rayonnement global quotidien de l'an 2021, b) Ecart relatif de la moyenne annuelle du rayonnement global quotidien de l'an 2021 par rapport à la normale climatologique 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc ..... 15
- Figure 8: Courbe d'Evolution temporelle de la température moyenne (Tmoy) annuelle nationale ; la ligne rouge représente la normale climatologique de Tmoy pour la période 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc ..... 20
- Figure 9: a) Courbe de classement des écarts de la moyenne annuelle de Tmax par rapport à la normale climatologique 1981-2010. b) Courbe de Classement des écarts de la moyenne annuelle de Tmin par rapport à la normale climatologique 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc..... 22
- Figure 10: a) Courbe d'Evolution temporelle de la pluviométrie annuelle nationale ; la ligne orange représente la normale climatologique pour la période 1981-2010. b) Courbe de classement des écarts relatifs du cumul pluviométrique annuel par rapport à la normale climatologique 1981..... 23
- Figure 11: Anomalie des précipitations du mois de Mars 2022. Source de données : Réanalyses ERA5..... 24
- Figure 12: Schéma des processus de télédétection passive (en haut) et active ..... 25
- Figure 13: L'image provient du satellite défilant Terra faisant partie du programme MODIS de la NASA. La résolution des photos prises est importante (1 pixel = 250m environ) et permet de faire des zooms assez poussés ..... 29
- Figure 14: Vue détaillée du secteur de l'ancienne mine de Rophin (lidar) ..... 30
- Figure 16: Écran radar vert avec carte du monde ..... 30
- Figure 17: Évolution de la surface enneigée moyenne (en millions de km<sup>2</sup>) au mois de mai dans l'hémisphère 534 Nord (1967-2014) établie à partir des cartes d'enneigement de la NOAA (mise à jour de Brown et Robinson, 2011) ..... 41
-

# Liste des abréviations

NDSI: Indice de Neige normalisé.

MNT: Modèle Numérique de terrain.

SIG: Système d'Information Géographique.

CSA: Agriculture soutenue par la communauté (Community supported agriculture).

SH: Hauteur de la neige (Snow Hight)

Télé: La Télédétection

SCA: Surface ouvre par la neige (Snow Cover Areas)

NAO: Oscillation Nord-atlantique

SWE: Equivalent en eau (Snow Water équivalent)

HSS: Indice de compétence de heidk (Heidks Skill Score)

SAR: Synthèse d'ouverture

RADAR: Radio Detection and Ranging

LIDAR: Light Detection and Ranging

## ***Introduction:***

---

Les précipitations désignent la chute de toute forme d'eau, liquide ou solide, de l'atmosphère vers la surface terrestre. Il peut s'agir de pluie, de neige, de grésil, de grêle ou de bruine. Les précipitations sont essentielles pour le cycle de l'eau et sont principalement causées par la condensation de l'humidité atmosphérique. Lorsque l'air chaud et humide se refroidit, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes ou en cristaux, formant ainsi les précipitations.

Les précipitations sont généralement mesurées en millimètres (mm) ou en pouces et sont exprimées en termes de hauteur de précipitations. Les régions du monde varient considérablement en termes de quantité de précipitations qu'elles reçoivent. Les régions tropicales et équatoriales ont souvent des précipitations abondantes tout au long de l'année, tandis que les régions désertiques peuvent connaître des périodes prolongées sans précipitations significatives. Les régions montagneuses peuvent également avoir des précipitations plus élevées en raison de l'effet d'ascension orographique, où l'air est forcé de monter et se refroidir, provoquant la condensation et la formation de précipitations.

Les précipitations sont importantes pour le cycle hydrologique, la recharge des nappes phréatiques, l'agriculture, la croissance des plantes, la formation des cours d'eau et des lacs, et pour maintenir l'équilibre écologique dans de nombreux écosystèmes. Les variations des précipitations peuvent avoir un impact significatif sur les activités humaines et l'environnement, y compris sur l'approvisionnement en eau, l'irrigation, la production agricole et la gestion des ressources en eau.

Les précipitations jouent un rôle crucial dans le bilan hydrique, qui est l'équilibre entre les apports et les pertes d'eau dans une région donnée. Les précipitations sont l'une des principales sources d'apport d'eau dans le bilan hydrique.

Le concept de balance ou **bilan hydrique** exprime l'équilibre des changements entre toutes les ressources en eau (précipitations, ruissellement) qui entrent dans un système (stockage) et celles qui le quittent (évapotranspiration), par rapport à une zone et à une période de temps.

Le bilan hydrique joue un rôle majeur dans la détermination de la quantité d'eau disponible pour une utilisation dans une région. Il permet de mesurer l'offre en eau, le stress hydrique et l'éventuel déficit hydrique, notamment pour prévoir les sécheresses ou, à l'inverse,

Les inondations. La quantité disponible est généralement moindre dans les régions arides que dans les climats humides.

On parle d'un **bilan hydrique climatique négatif** si l'évaporation annuelle potentielle est supérieure aux précipitations d'une année. Un **bilan hydrique positif** existe lorsque l'évaporation réelle est inférieure aux précipitations, de sorte que le ruissellement de surface et l'infiltration de l'eau dans le sol sont possibles.

La neige joue un rôle crucial dans le bilan hydrique et la régularisation des apports en eau, en particulier dans les régions où elle est une source importante d'eau, notamment lors de sa période de fonte. Lorsqu'il neige, une partie de l'eau contenue dans l'atmosphère se condense et se transforme en neige, qui s'accumule au sol. Cette accumulation de neige peut se produire pendant toute la saison hivernale.

Au printemps ou lorsque les températures augmentent, la neige fond et se transforme en eau liquide, ce qui entraîne une augmentation du débit des cours d'eau et des rivières. La fonte des neiges contribue donc aux apports en eau dans le bilan hydrique global de la région. Il est important de mesurer et de comprendre la quantité de neige accumulée et de suivre la fonte de la neige pour prédire les débits des cours d'eau, gérer les ressources en eau, prévenir les inondations et planifier les activités agricoles. Cela peut être réalisé grâce à des techniques telles que les mesures au sol, les relevés aériens, les observations satellitaires et les modèles hydrologiques.

Eu égard à son importance comme source d'eau stockée pendant la saison hivernale et libérée progressivement lors de sa fonte, influençant ainsi les flux d'eau dans un système hydrologique donné, la neige est un élément essentiel du bilan hydrique dont la dynamique mérite qu'elle soit suivie et dont les apports en eau soit évalués

Au Maroc, et plus particulièrement dans les régions du pourtour de l'Atlas, la nature irrégulière des précipitations, combinée à une évaporation généralement élevée, rend délicate une gestion prévisionnelle des ressources en eau. Il est par conséquent important de bien comprendre les processus et les variables contrôlant le cycle hydrologique dans ces régions.

Par ailleurs, ces variations spatiales et temporelles de la couverture neigeuse font objet de plusieurs études. Ces variations sont confrontées avec les mesures météorologiques et hydrologiques disponibles (précipitations, températures et débits...) pour comprendre les liens entre la dynamique neigeuse et les ressources en eau.

Dans ce contexte, ce travail se fixe comme objectif la réalisation d'une synthèse bibliographique relative aux méthodes de suivi des surfaces enneigées par télédétection. Il s'agit de construire l'état de l'art quant aux données et approches méthodologiques utilisées nous avons examiné la possibilité d'utiliser la télédétection spatiale pour quantifier caractériser la dynamique spatiale et temporelle du manteau neigeux et extraire ses propriétés intrinsèques (densité, teneur en eau...).



## **Chapitre1 : La Neige**



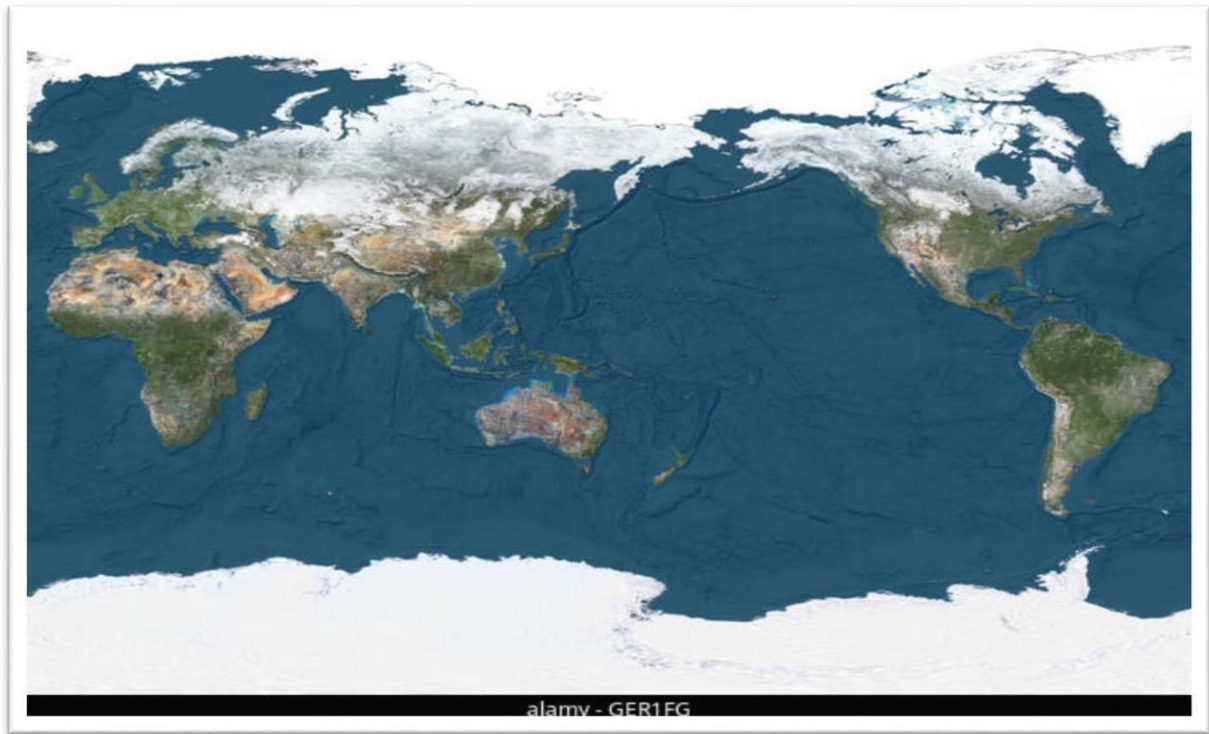
**En hiver s'il fait de la bruine, la neige ou la grêle est voisine.**

# INTRODUCTION

Dans les zones semi-arides et arides, la gestion durable des ressources en eau nécessite une quantification précise de la variabilité des eaux de surface et des eaux souterraines. Dans de nombreux bassins versants semi-arides, le cycle hydrologique est influencé par la présence d'une chaîne de montagnes, ce qui favorise les précipitations. L'altitude élevée des régions montagneuses constitue une zone de production d'eau, tandis que l'eau est utilisée dans les plaines en aval principalement pour l'irrigation. Dans les zones de captage supérieures, la partie solide des précipitations est importante et forme un manteau neigeux saisonnier où l'eau est stockée pendant l'hiver. Les eaux de fonte alimentent les cours d'eau, remplissent les réservoirs et contribuent à la recharge des nappes phréatiques plus tard au printemps. L'effet tampon joué par le manteau neigeux est essentiel pour le secteur agricole, en particulier pour les cultures dont les besoins en eau atteignent leur maximum pendant la période sèche et chaude de l'été. Plusieurs études ont souligné la Méditerranée comme un "point chaud" du changement climatique associé à une augmentation de la température de 2 à 3 °C et à une baisse des précipitations d'environ 20 à 30%

## 1 NEIGE AU MONDE

La neige peut se produire dans de nombreuses régions du monde, principalement dans les régions froides et montagneuses. Elle est plus fréquente dans les zones proches des pôles et des régions montagneuses, où les températures sont plus basses. Cependant, la neige peut également tomber dans des régions plus tempérées lors de périodes de froid intense.



**Figure 1:** Carte Satellite du monde en hiver, avec la couverture de neige partielle. Cette image a été compilé à partir de données acquises par les satellites Landsat 7 et 8. (<https://c8.alamy.com/compfr/ger1f3/carte-satellite-du-monde-en-hiver-avec-la-couverture-de-neige-partielle-cette-image-a-ete-compile-a-partir-de-donnees-acquises-par-les-satellites-landsat-7-et-8-ger1f3.jpg>)

La neige relativement très peu dans les régions équatoriales et tropicales. On a coutume de considérer que les 35 parallèles délimitent cette région où seules les montagnes reçoivent de la neige. Le Cayambe, sommet équatorien de 5790 m, est régulièrement enneigé bien qu'il soit exactement à la latitude 0.

Plus on se rapproche des pôles, plus la niviosité augmente en général mais elle diminue dans les régions polaires car l'humidité y devient trop faible, emprisonnée dans les glaces. Par ailleurs, les zones côtières sont relativement épargnées par la neige, car les températures y sont tempérées par celle de la mer, mais l'humidité contenue dans le flux marin peut être transportée sur le continent et y donner de fortes chutes. C'est donc dans les régions tempérées et montagneuses mais en flux de la mer qu'on relève des chutes record :

1. Plus forte chute en 24 heures : 2,56 mètres à Capra cotta, en Italie, le 5 mars 2015 ;
2. Plus importante en un mois civil : en janvier 1911, Tama rack (Californie) a reçu 9,91 mètres de neige, ce qui a entraîné un manteau neigeux de 11,46 mètres d'épaisseur en mars (la plus grande épaisseur mesurée en Amérique du Nord) 26,27

3. Enneigement maximum du 1er juillet au 30 juin : 28,96 m, mont Baker, Washington (États-Unis) durant l'hiver 1998-1999 ;
4. Enneigement maximum sur une période d'un an (quel que soit le début) : 31,5 mètres mont Rainier, Washington (États-Unis), du 19 février 1971 au 18 février 1972 ;
5. Les plus épais manteaux neigeux enregistrés : 11,82 mètres sur le mont Ibuki, Japon, le 14 février.

## 2 La Neige au Maroc:

### 2.1 Les facteurs des chutes de neige:

#### 2.1.1 Morphométrie du Maroc:

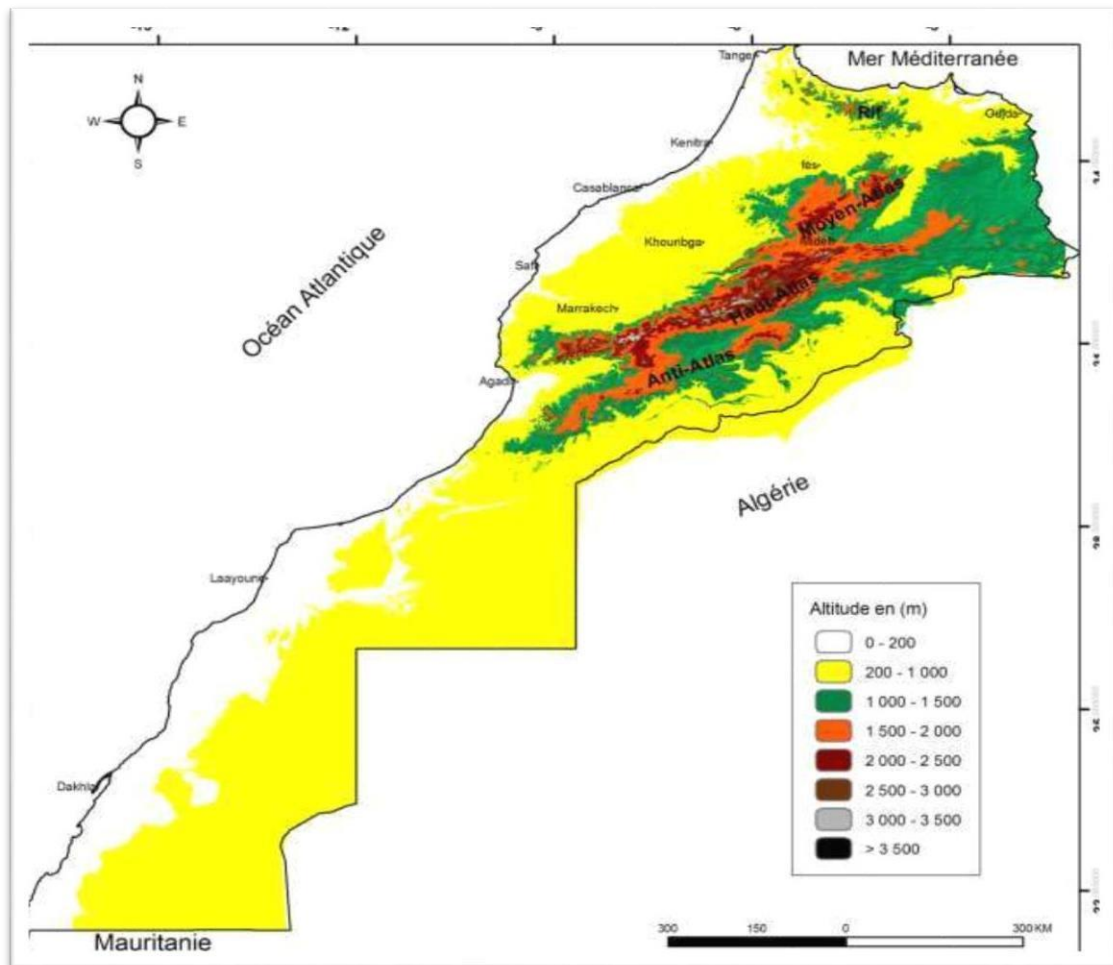
La chaîne de montagnes de l'Atlas s'étend sur plus de 700 kilomètres selon un axe ouest-sud-ouest à est-nord-est, avec une largeur de 70 kilomètres (**Figure 2**). Elle forme au centre du Maroc une barrière entre la mer Méditerranée au nord du Maroc et le Sahara. Elle est composée de sept bassins versants influencés à la fois par les précipitations et la fonte des neiges, et est subdivisée en trois unités physiographiques : l'Anti-Atlas, le Haut Atlas et le Moyen Atlas.

Les sept bassins versants sont le Draa et le Sous, situés dans l'Anti-Atlas, avec des altitudes variantes entre 1500 et 2000 mètres d'altitude. Le Tensift, Oum rabie ' et le Ziz Rheris, situés dans la chaîne du Haut Atlas, tandis que le Sebou et la Moulouya se trouvent dans le Moyen Atlas

Plissement majeur du Maroc, le Haut Atlas, qui compte plusieurs sommets dépassant 4000 m, s'étend sur près de 700 km entre Agadir et Talsint. A partir de Béni Mellal il se trouve doublé au N. par le Moyen Atlas, moins élevé (3 300 m) et plus tabulaire. Bien entendu, Les précipitations les plus importantes se produisent sur cet ensemble de hauts reliefs, disposé selon la tendance générale atlasique WSW-ENE. Les hauteurs recueillies décroissent du N. au S., ainsi que du N-W Au S-E (**fig. 2**). Les dépressions, il est vrai, privilégient les hauts sommets au détriment de vastes zones sèches situées au-delà, et donc sous le vent, par rapport à la montagne : haute Melwiya, Tafilalet, vallée du Dra'

Le Rif est une région montagneuse située au nord du Maroc, et bien qu'elle soit célèbre pour son climat méditerranéen doux, il est possible de voir de la neige dans les sommets pendant les mois d'hiver.

Les montagnes du Rif, notamment le massif du Djebel Tidighine et le Djebel Tazzeke, peuvent recevoir des chutes de neige abondantes en hiver, généralement entre décembre et février. Les altitudes élevées de certaines zones permettent aux températures de descendre suffisamment pour que la neige puisse tomber et tenir au sol pendant plusieurs jours, voire plus longtemps en cas de période froide prolongée.



**Figure 2:** Carte de classification des régions selon l'altitude. [1]

### 2.1.2 Les caractéristiques du Climat:

Le Maroc est situé à l'extrémité Nord-Ouest du continent Africain entre les latitudes 20.8° et 36° Nord et les longitudes 1° et 17° Ouest son climat est varié avec sa topographie qui comprends les montagnes du Rif au Nord les montagnes de l'Atlas au centre avec un sommet qui culmine à 4165 m, les plaines et la cote à l'Ouest les plaines et la cote à l'Ouest les plateaux à l'Est et le désert au Sud ,le climat du Maroc varie considérablement du Nord au Sud du pays; du tempéré au semi-aride au désertique selon la classification de

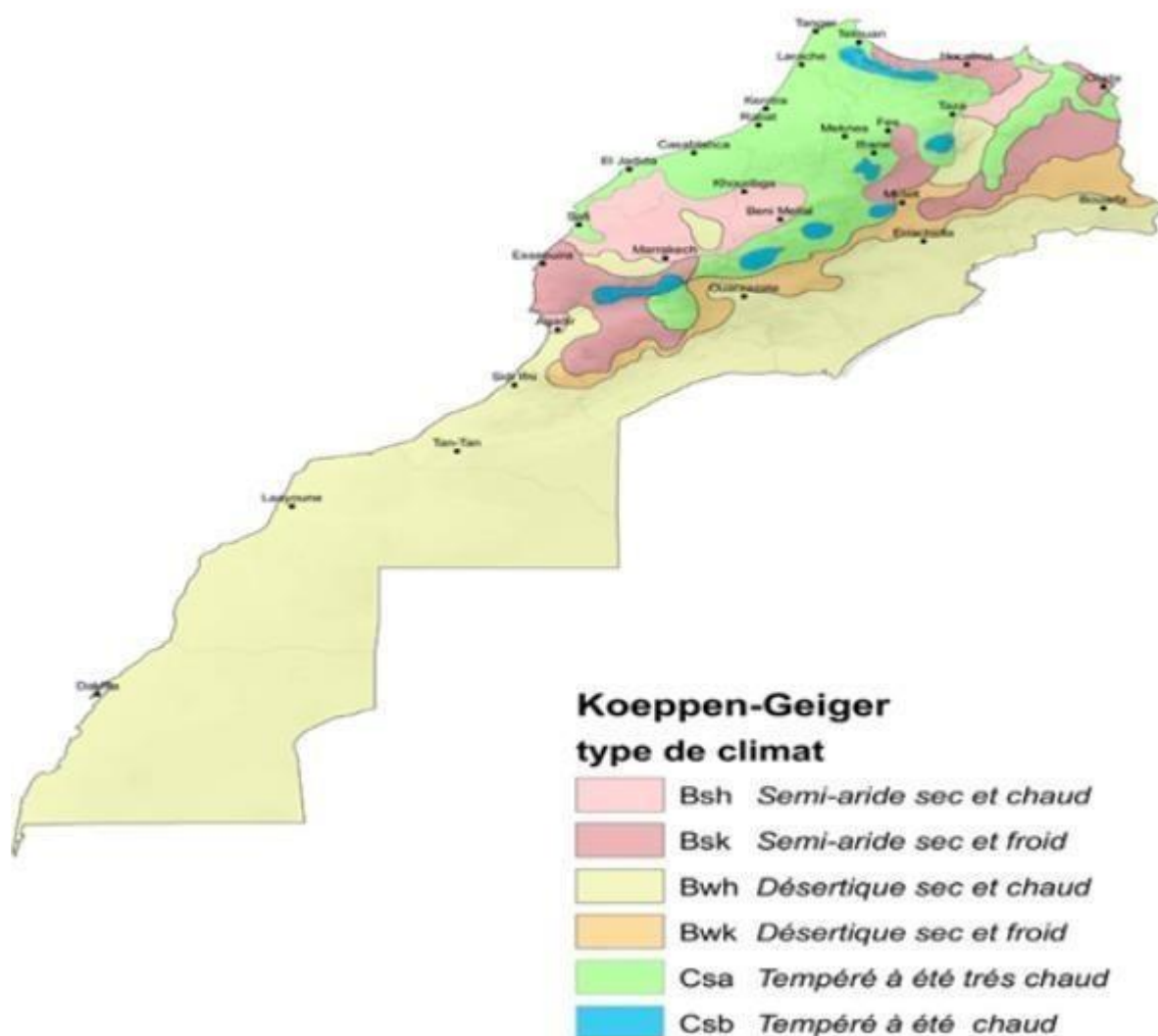
Koppen-Geiger (**figure3**). Les précipitations et la température sont fortement influencées par l'Océan Atlantique à l'Ouest, la mer Méditerranée au nord et le désert de Sahara au sud et au Sud-est.

La plupart des précipitations du pays se produisent entre septembre et mai considérée comme la saison pluvieuse et agricole au Maroc. La majeure partie du Maroc, en particulier le long des côtes, connaît un climat typiquement méditerranéen, avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Les précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 1 200(mm), sur le Rif et la neige peut se produire dans les régions montagneuses de l'Atlas et de Rif entre novembre et avril. Le sud est beaucoup plus sec et reçoit moins de 100mm de précipitation en moyenne chaque année. Les températures moyennes annuelles dépassent les 22°C sur le sud et le sud-est du pays, varient entre 12 et 18°C sur les reliefs et les hauts plateaux et varient entre 18 et 20°C ailleurs. En été, la température maximale quotidienne dépasse fréquemment les 40°C à l'intérieur. En hiver, la température minimale descend en dessous de 0°C au niveau des zones montagneuses

Toutes les stations possèdent un climat tempéré méditerranéen à été chaud et sec (Csa) selon la classification de Koppen-Geiger Sur l'année.

---

Climat du Maroc selon la classification de Koeppen-Geiger(1981-2010)



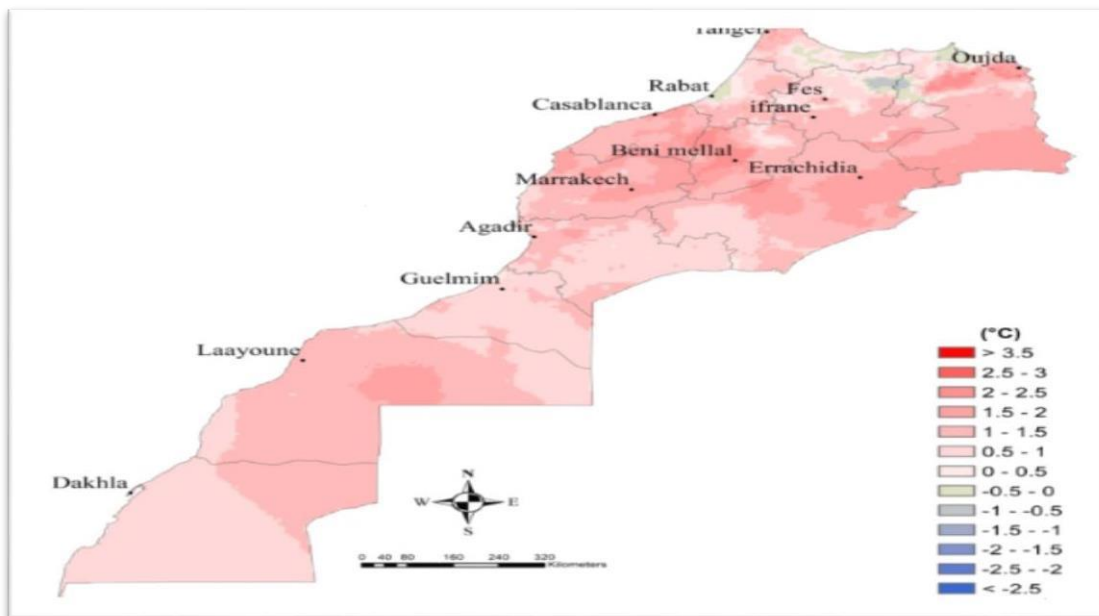
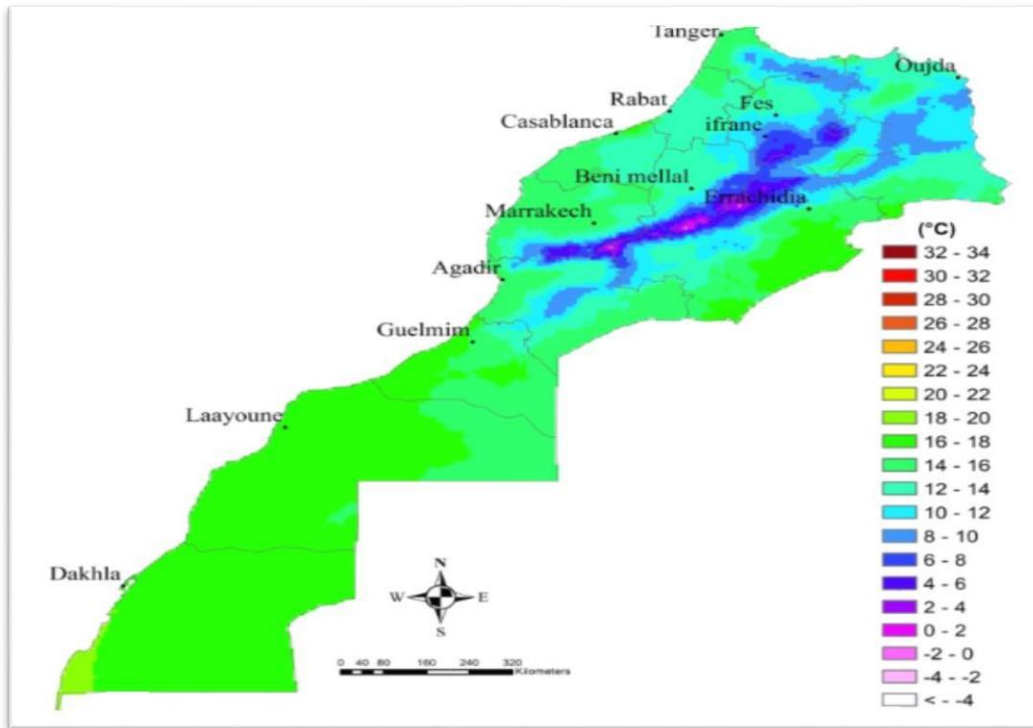
---

**Figure3:** Carte du climat du Maroc selon la classification de Koeppen-Geiger 1981-2010 [2].

### 2.1.2.1 Régime thermique:

En 2022, la température minimale moyenne a varié entre -2 et 06 °C sur les sommets du Haut et Moyen Atlas, entre 06 et 10 °C sur le rif, entre 8 et 10°C sur l'Anti-Atlas et les hauts plateaux de l'oriental, entre 16 et 20 °C sur le sud et entre 10 et 14°C en général partout ailleurs (**Figure 4(a)**). Ces valeurs sont anormalement chaudes (**figure 4(b)**) en comparaison

avec la normale calculée sur la période 1981-2020. L'anomalie de température est comprise entre 0.5 et 1.5 °C sur les reliefs de l'atlas, les versants Est et une majeure partie de l'oriental.



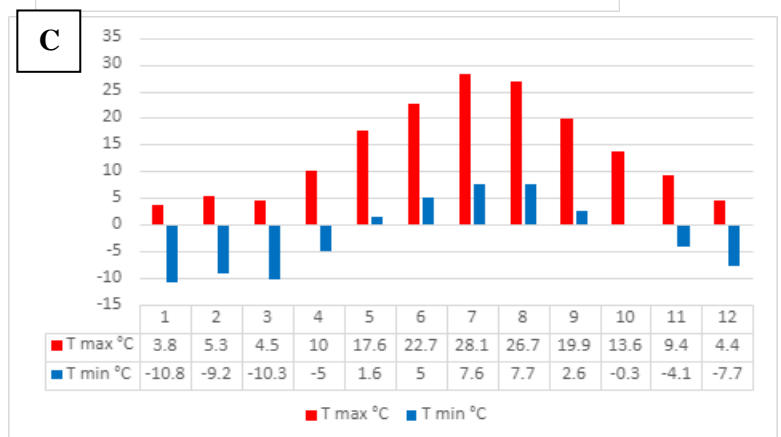
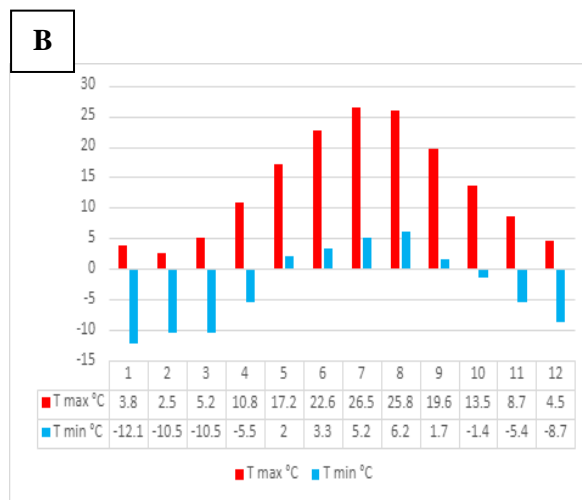
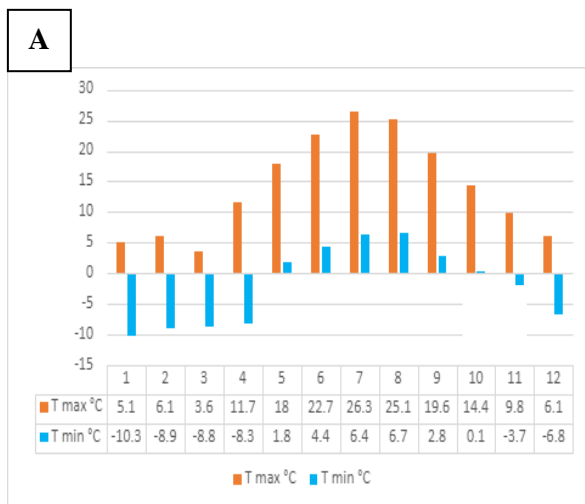
**Figure4:**a) Carte de la Température minimale moyenne annuelle de l'an 2022. b) carte de la température minimale moyenne annuelle de 2022 par rapport à la normale climatologique 1981-2010.



La continentalité excessive du Maroc intérieur est, heureusement, atténuée en montagne par l'altitude, ainsi que par les saisons. On donne pour Ifrane (1 635 m) une amplitude diurne estivale de 17° contre 13° en hiver ; Azrou (1 250 m) 15° en été, 10° en hiver. La température moyenne annuel à Toubkal (4165 m) est de 19.7°C, à Ighil Mgoun (4071 m) est de 19.5°C et 14.8°C à Jbel Ayyachi (3751 m)

La diminution de la température avec l'altitude est moins prononcée qu'en Europe, ce qui permet d'estimer un gradient thermique de 0,43°C pour chaque tranche de 100 mètres dans la partie nord du Moyen Atlas tabulaire. Dans les autres massifs isolés, ce gradient sera plus élevé.

L'isotherme 0° C se maintient entre 3 500/4 000 m pendant la saison sèche (juin-septembre), mais il plonge parfois aux abords de 1 000 m en hiver.



**Figure 5:** Diagramme de la température moyenne mensuelle dans les trois sommets : A/ Jbel Toubkal, B/ Jbel Mgoun, C/ Jbel Ayyachi

Au mois de Juillet, la température moyenne est de 28.1 °C à Jbel Ayyachi ,26.3 °C à Toubkal et 26.5 à Jbel Mgoun. Juillet est de ce fait le mois le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de 9.2°C à cette période.

L'humidité relative de l'air en montagne joue un rôle déterminant. À Ifrane, par exemple elle atteint 46 % en novembre-décembre et 36 % en février-avril. Par temps anticyclonique hivernal, l'humidité peut baisser à 40 %. En revanche, en août, elle n'est que de 20 %, car la montagne est soumise aux influences sahariennes. À Jbel Toubkal pour l'intervalle hivernal on a 62 % et 49% en avril –juin, en août, elle n'est que 39%.

### **2.1.2.2 Régime Pluviométrique:**

Le régime pluviométrique au Maroc varie en fonction de la région et de la saison. Globalement, le Maroc connaît un climat méditerranéen avec des hivers frais et pluvieux, et des étés chauds et secs. Cependant, il existe des variations régionales importantes en raison de la diversité topographique du pays, qui comprend des montagnes, des plaines côtières et le désert du Sahara.

**Régions côtières :** Les régions côtières du Maroc, telles que Tanger, Rabat, Casablanca et Agadir, bénéficient d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et pluvieux, et des étés chauds et secs. Les précipitations sont plus fréquentes pendant les mois d'automne et d'hiver, tandis que les étés sont généralement secs.

- **Régions montagneuses :** Les régions montagneuses du Maroc, notamment l'Atlas, reçoivent des précipitations plus abondantes en raison de l'effet de relief. Les montagnes de l'Atlas connaissent des hivers froids avec des chutes de neige fréquentes, tandis que les étés sont plus frais. Les précipitations sont plus élevées pendant les mois d'hiver et de printemps, ce qui contribue à l'accumulation de neige dans les altitudes plus élevées.
- **Régions désertiques :** Les régions désertiques du Maroc, telles que le Sahara, sont caractérisées par des précipitations très faibles et sporadiques. Les pluies sont rares et se produisent principalement pendant les mois d'hiver. Les températures dans le désert peuvent être extrêmement élevées pendant l'été, tandis que les nuits peuvent être froides en hiver.

### 2.1.2.2.1 Précipitation sous forme de pluies:

Le cumul pluviométrique (**figure 6**) a dépassé les 500 mm sur le Saïss, le Rif, le Nord-Ouest et quelques communes du haut Atlas au sud de la région Marrakech-Safi. Il est compris entre 360 mm et 500 mm sur la bande côtière atlantique de Kenitra à El Jadida et les côtes méditerranéennes à l'est d'Al Hoceïma et au centre des régions de l'Orientale et de Fès-Meknès. Les provinces sahariennes au sud de Guelmim ont enregistré moins de 50 mm. Le sud de l'Orientale, les bassins sud-est de l'Atlas et le sud de Marrakech-Tensift ont enregistré des cumuls variables entre 50 mm et 200 mm alors que le cumul était entre 200 mm et 360 mm ailleurs. En comparaison avec la normale climatologique 1981-2010, la majeure partie du pays a connu un déficit pluviométrique à l'exception de la bande côtière allant de Rabat à El Jadida.

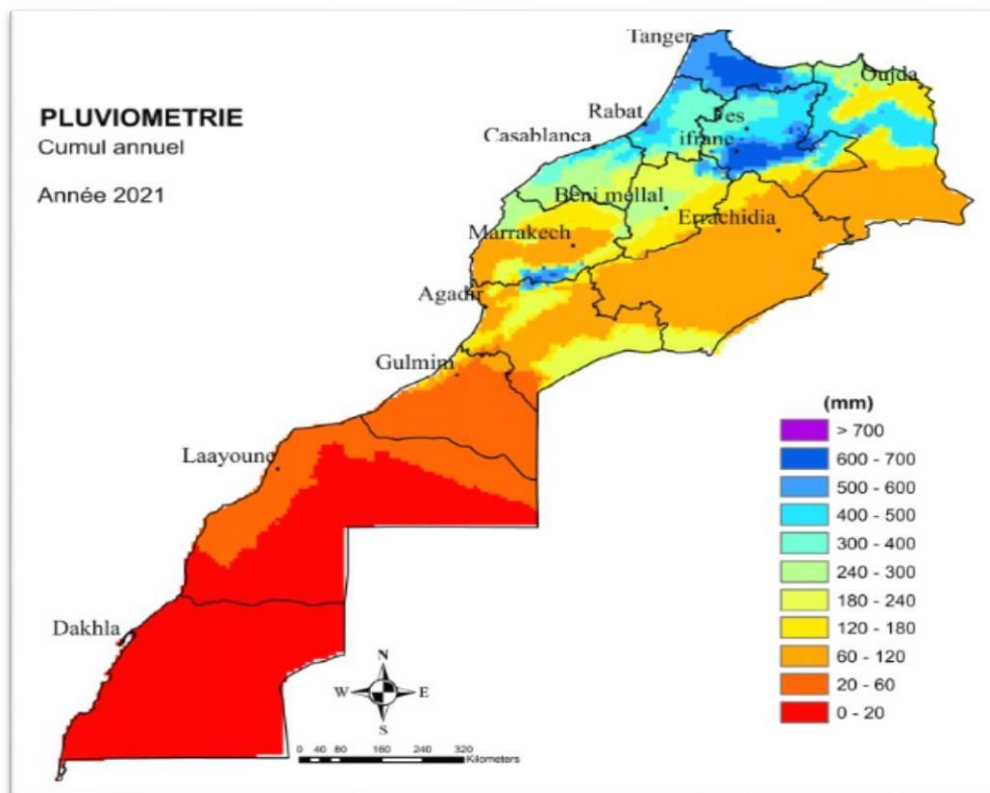
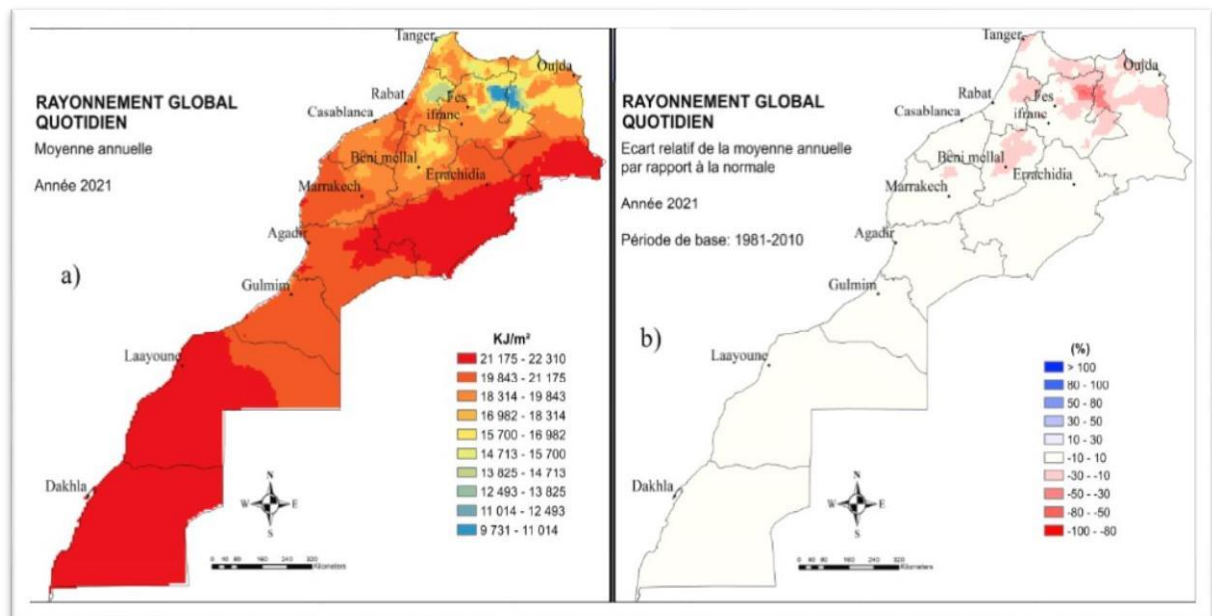


Figure 6: Carte de Cumul pluviométrique annuelle de l'an 2021. [3]

### 2.1.2.3 Rayonnement global:

Au cours de l'année 2022, la moyenne annuelle du rayonnement global quotidien était proche de sa normale climatique sur la majorité du Maroc. Des écarts relatifs négatifs sont notés sur le l'oriental, Al Hoceima, le Tangérois, l'est de Fès-Meknès, Al Gharb et Tadla. Les valeurs enregistrées varient entre 9.5 et 22.9 mJ/m<sup>2</sup> par jour ; elles sont plus importantes sur le sud du Maroc et à l'Est des hautes montagnes de l'Atlas.



**Figure 7:** a) Carte de moyenne annuelle du rayonnement global quotidien de l'an 2021, b) Ecart relatif de la moyenne annuelle du rayonnement global quotidien de l'an 2021 par rapport à la normale climatologique 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc.

### 2.1.2.4 Dépressions ou flux apportant la neige:

Contrairement à la pluie, le délai entre les chutes de neige et le ruissellement résultant de sa fonte rend difficile l'estimation du temps et du volume de fonte des neiges et d'apport d'eau au cycle hydrologique de la région et nécessite le développement de modèles hydrologiques complexes. Étant donné que les chutes de neige se produisent généralement dans les latitudes moyennes et élevées et les régions montagneuses, les spécifications topographiques de la région, y compris son altitude, sa pente et même son aspect, ont un impact sur la neige et ses caractéristiques telles que l'enneigement, l'épaisseur de la neige et l'équivalent en eau de la neige.

Le rythme saisonnier du climat atlasique est déterminé essentiellement par les conditions aérologiques sévissant à + 500 mb. A la saison humide, le pays est dominé par des perturbations du Front polaire dont les masses d'air froid parviennent au Maghreb depuis des zones continentales et maritimes, souvent en rapport avec les Anticyclones des Açores, ou du continent eurasiatique. Entre 1950 et 1962, sur un échantillon de 50 situations Atmosphériques ayant entraîné des chutes de neige, on relève:

- 56 % des cas attribuables à Y air polaire (dont 24 % de flux, d'advections ou d'expulsions d'air polaire sans précision d'origine, 20 % d'air polaire maritime, et 12 % d'air polaire continental);
- 18 % des cas attribuables à des fronts froids actifs du N. (sans autre précision) ou à de Y air arctique;
- 14 % de cyclogenèse au large du Portugal donnant lieu à des perturbations atlantiques orientée W-E., souvent avec zone de dépression complexe centrée sur la péninsule ibérique;
- 8 % de conflits entre l'air polaire et l'air tropical continental;
- 4 % de perturbations sahariennes 1.

## **2.2 Les chutes de neige:**

### **2.2.1 Hauteur des chutes:**

Lors des premières chutes de neige importantes en décembre, on peut mesurer une hauteur de 50 cm à Ifrane (1 635 m), tandis qu'à l'Oukaïmedden, situé à 2 600 m, on ne relève que 40 cm. Le régime pluvio-thermique du Haut Atlas de Marrakech est moins favorable, à altitude égale, que celui du Nord du Moyen Atlas, surtout en début d'hiver. En plein cœur de la saison, vers le sommet de la combe de l'Oukaïmedden, l'épaisseur de neige peut atteindre 1,50 m. Entre mars et mai, des chutes de neige importantes peuvent se produire, mais Ifrane n'est plus vraiment concernée à cette période. [1]

En réalité, la neige s'accumule considérablement dans les zones sous le vent en raison des transferts éoliens, atteignant parfois 2 à 3 mètres ou plus dans la combe du Tizi nZiruch (massif du Bou Iblane). En revanche, les sommets arrondis (Bou Iblane, 'Ayyachi, M'asker, Mgoun, etc.) sont souvent dépourvus de neige car ils sont exposés au vent dominant du sud-ouest. Cela est également valable pour les environs des cols qui relient des synclinaux

Orientés SW-NE. Dans l'Atlas, il arrive parfois que l'épaisseur de la neige diminue avec l'altitude.

Chaque hiver une couche d'environ un mètre est signalée dans les petites stations du Moyen Atlas. Au Jbel Hebri, grâce à son exposition nord-est et à la présence de cèdres, les skieurs peuvent profiter de la piste jusqu'à trois semaines après de fortes chutes de neige (janvier 1980). Cependant, le manteau neigeux persiste pendant assez longtemps sur les plateaux environnants, où l'épaisseur est faible (30 à 40 mm), ce qui permet encore la pratique du ski de fond. Des chutes de neige de 1,50 mètre sont parfois signalées à des altitudes relativement basses dans le Haut Atlas, par exemple 1,50 m à Aghbala (1 671 m) et Imilchil (2 200 m), ainsi qu'un mètre ou plus à Ayt Mhammed (1 680 m).

### **2.2.2 La qualité de la neige:**

Les premières chutes de neige ne font que recouvrir les touffes et les cailloux. Cependant, si les chutes se répètent et que le beau temps intervient, on observe une première évolution de la neige. À partir de la mi-novembre, il est possible de trouver de la neige durcie due aux cycles de fonte et de gel, la neige reste poudreuse plus longtemps à des altitudes élevées (au-dessus de 3 000 m) qu'à des altitudes plus basses. Ensuite, en janvier-février, elle forme une croûte en surface et devient molle en dessous. Près des cols, elle est fortement soufflée par le vent. Dans le Moyen Atlas, vers 2 000 m d'altitude, la neige poudreuse est vulnérable aux légères périodes de redoux, mais sa transformation est plus lente à l'ombre des cèdres. Les chutes tardives (avril-mai) donnent lieu à de la neige molle et lourde, surtout dans les parties basses de la montagne.

D'un autre côté, les premiers coups de chergui (vent chaud du désert) commencent à transformer la neige, offrant aux skieurs la possibilité de découvrir la "neige de printemps". En mars, lorsque les températures restent relativement basses, certains couloirs orientés nord-est (comme la combe de Taghiala au Moussa ou Salah, ou le couloir du Baddou près du M'asker) ne fondent que superficiellement entre 10 h et 14 h ; ensuite, l'ombre arrive et le regel se produit à nouveau. Il est alors fréquent de trouver plusieurs types de neige sur une même pente.

De plus, la qualité du manteau neigeux peut varier à l'intérieur d'un même massif pour différentes raisons, telles que l'exposition, l'action du vent et les effets de cuvette.

### 2.2.3 Répartition géographique :

La neige au Maroc se trouve principalement dans les régions montagneuses, en particulier dans l'Atlas et le Haut Atlas. Voici une répartition géographique générale de la neige dans ces régions :

- **Haut Atlas:** Le Haut Atlas est la chaîne de montagnes la plus élevée du Maroc et abrite le mont Toubkal, le plus haut sommet d'Afrique du Nord. Cette région reçoit généralement de fortes chutes de neige en hiver, avec des altitudes élevées qui maintiennent souvent la neige pendant une grande partie de l'année.
- **Moyen Atlas:** Le Moyen Atlas est une autre chaîne de montagnes importantes au Maroc. Bien que les altitudes soient moins élevées par rapport au Haut Atlas, il peut y avoir des chutes de neige dans certaines parties de cette région pendant l'hiver, en particulier sur les sommets les plus élevés.
- **Anti-Atlas:** L'Anti-Atlas est une chaîne de montagnes situées au sud du Haut Atlas. Les chutes de neige dans cette région sont moins fréquentes et moins abondantes que dans les autres régions montagneuses du Maroc.

### 2.2.4 Périodicité des chutes :

La périodicité des chutes de neige au Maroc peut varier en fonction de la région et des conditions météorologiques spécifiques à chaque année. Voici une approximation générale basée sur des données historiques :

- **Haut Atlas:** Les chutes de neige dans le Haut Atlas sont plus fréquentes et plus abondantes que dans d'autres régions du Maroc. En général, la période la plus propice à la neige dans cette région s'étend de novembre à avril, avec les mois de décembre, janvier et février étant les plus susceptibles de recevoir des chutes de neige importantes. Cependant, des chutes de neige plus légères peuvent également se produire en novembre et avril.
- **Moyen Atlas:** Dans le Moyen Atlas, les chutes de neige sont généralement moins fréquentes et moins abondantes que dans le Haut Atlas. Les mois de décembre à mars sont généralement les plus susceptibles de voir de la neige dans cette région, bien que les quantités puissent varier considérablement d'une année à l'autre.

- **Anti-Atlas:** Les chutes de neige dans l'Anti-Atlas sont relativement rares en raison de son emplacement plus au sud. La neige peut survenir occasionnellement pendant les mois de décembre à février, mais elle est généralement limitée aux altitudes les plus élevées de la chaîne de montagnes.

### 2.2.5 Altitude des chutes suivant la saison:

Les chutes de neige dans les montagnes de l'Atlas varient en fonction de la saison et de l'altitude. Lors des années de fortes chutes de neige, les chutes se produisent généralement une ou deux fois, parfois plus, aux environs de 1 000 mètres d'altitude. Des cas ont également été signalés à des altitudes inférieures, notamment sur les contreforts du Moyen Atlas et les plaines de l'Oriental à des altitudes inférieures à 800 mètres,

Au-dessus de 1 500 mètres d'altitude dans le Moyen Atlas (2 000 mètres dans le Haut Atlas), les chutes de neige sont fréquentes pendant au moins cinq mois de l'année. Ces chutes de neige peuvent ralentir la circulation sur les grands cols de l'Atlas, mais elles offrent également des opportunités de ski dès la fin décembre.

Aux altitudes supérieures à 2 800/3 000 mètres, la neige peut apparaître à n'importe quel moment entre fin septembre et début juin. Les observations personnelles ne permettent pas de confirmer la théorie selon laquelle l'Atlas connaîtrait des hivers moins enneigés qu'il y a 20 ou 30 ans. Il peut y avoir des cycles de 6-7 ans relativement humides ou secs. Il y avait de la neige à partir de 2 800/3 000 mètres sur le Jbel el 'Ayyachi et le M'asker en septembre. De nos jours, dans ces massifs, les premières neiges se situent généralement plus haut et plus tard (à partir de 3 200 mètres, en octobre).

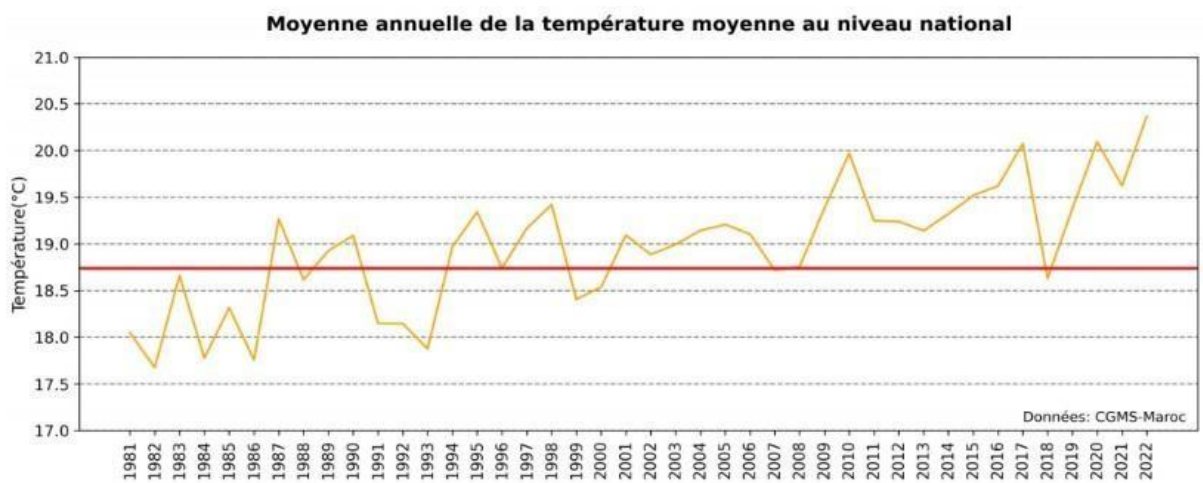
## 3 Changement du climat:

Les changements climatiques ont un impact sur la quantité de neige de plusieurs manières. Globalement, les températures plus élevées résultant du réchauffement climatique entraînent une diminution de la quantité de neige dans de nombreuses régions. Et peut modifier les conditions météorologiques qui favorisent les chutes de neige. Par exemple, des températures plus chaudes peuvent entraîner une plus grande instabilité atmosphérique, ce qui favorise les précipitations sous forme de pluie plutôt que de neige.



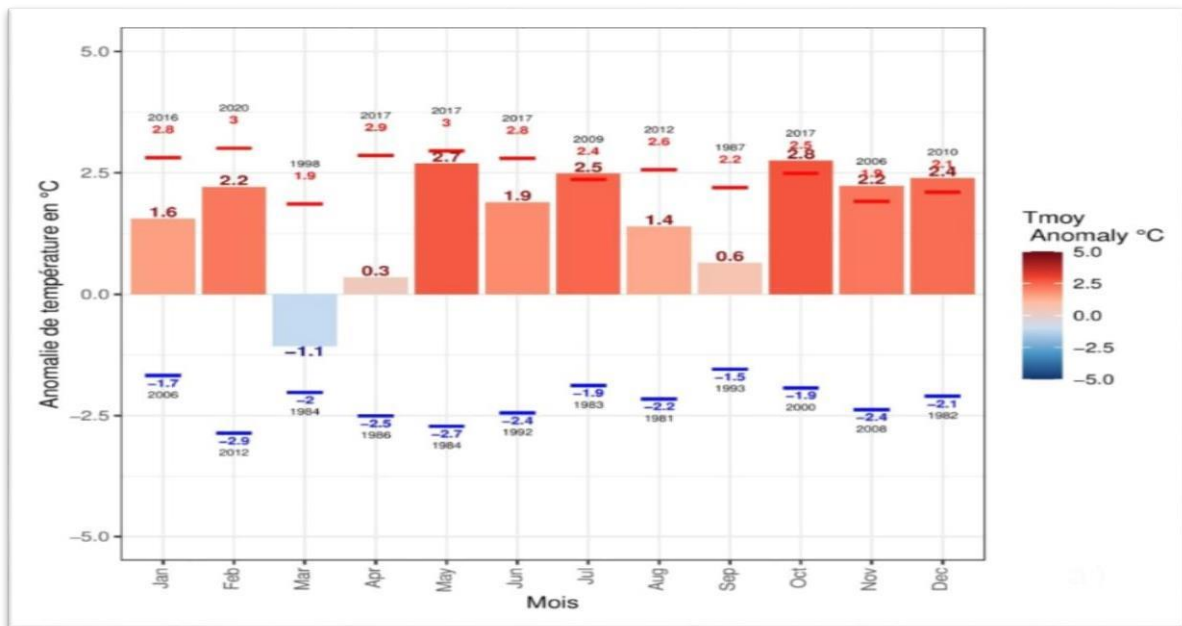
### 3.1 La Température:

Le réchauffement climatique entraîne la fonte précoce de la neige. Les températures plus chaudes font fondre la neige plus tôt au printemps, réduisant ainsi la durée de la saison des neiges. L'anomalie de la température moyenne annuelle de l'an 2022 est d'environ 1,63°C Au niveau national par rapport à la normale climatologique calculée sur la période 1981-2010. Elle représente l'anomalie la plus élevée depuis 1981 suivie par 1,37°C enregistrée En 2020 et 1,33°C enregistrée en 2017. Les températures moyennes annuelles au niveau National en 2022, 2020 et 2017 étaient respectivement, de 20,36°C, 20,1°C et 20,06°C (**Figure 9**).



**Figure8:** Courbe d'Evolution temporelle de la température moyenne (Tmoy) annuelle nationale ; la ligne rouge représente la normale climatologique de Tmoy pour la période 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc.

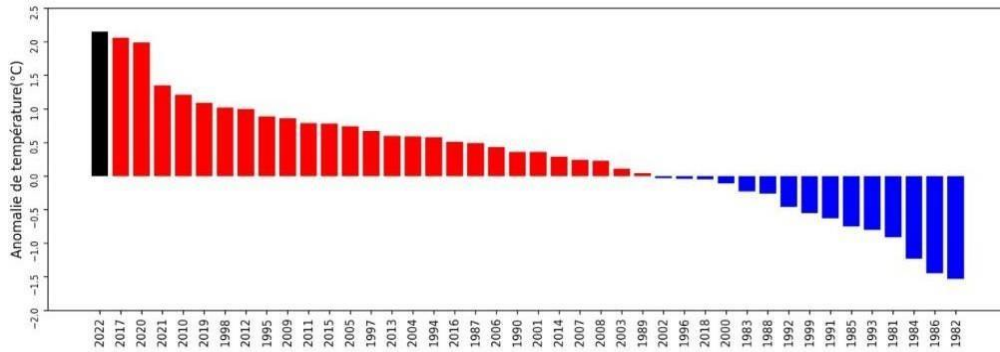
A part le mois de mars (**Figure 9**), tous les mois ont enregistré des températures Moyennes supérieures aux normales climatologiques avec de nouveaux records de Température moyenne mensuelle en juillet, octobre, novembre et décembre. 2022 a Connue 288 jours avec des températures moyennes en dessus de la normale ; soit 80% des jours de l'année.



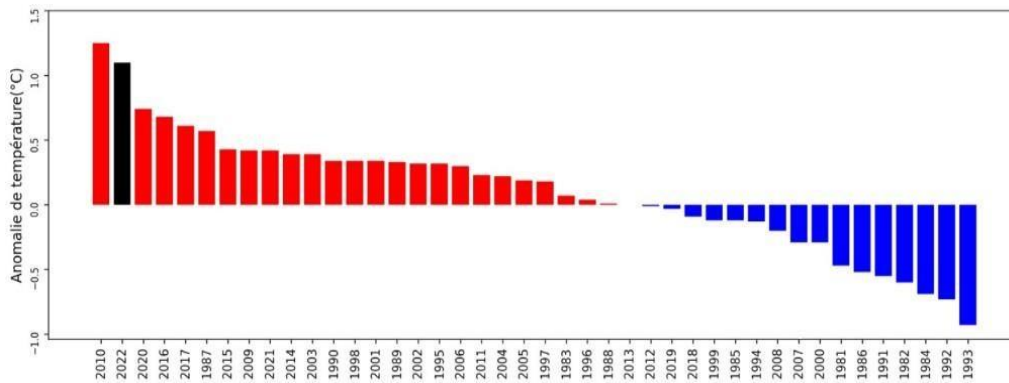
**Figure9:** Courbe d'Anomalies de la température moyenne mensuelles et annuelle pour l'année 2022.

L'année 2022 est également une année record concernant la température maximale moyenne au niveau national avec un écart de 2,1°C par rapport à la normale Climatologique de 1981-2010 devant les années 2017 et 2020 dont les écarts ont atteint Respectivement 2,06°C et 1,99°C. Quant à la température minimale annuelle moyenne sur L'ensemble du territoire, elle est la deuxième la plus chaude depuis 1981, après celle de 2010, avec un écart d'environ 1,1°C par rapport à la normale climatologique (**Figure 10**).

a) Tri descendant des anomalies de la température maximale au niveau national



b) Tri descendant des anomalies de la température maximale au niveau national



**Figure9:**a) Courbe de classement des écarts de la moyenne annuelle de Tmax par rapport à la normale climatologique 1981-2010. b) Courbe de Classement des écarts de la moyenne annuelle de Tmin par rapport à la normale climatologique 1981-2010. Source de données : CGMS-Maroc.

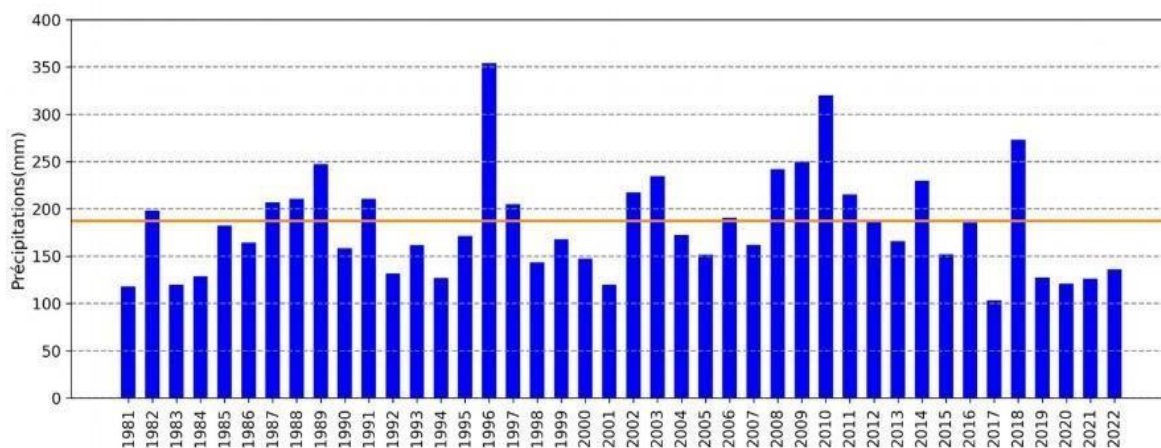
### 3.2 Les Précipitations :

Les changements climatiques affectent les précipitations. Dans certaines régions, les chutes de neige peuvent diminuer en raison de modifications des régimes de précipitations. Dans d'autres régions, les précipitations peuvent augmenter, mais sous forme de pluie plutôt que de neige, en raison des températures plus élevées.

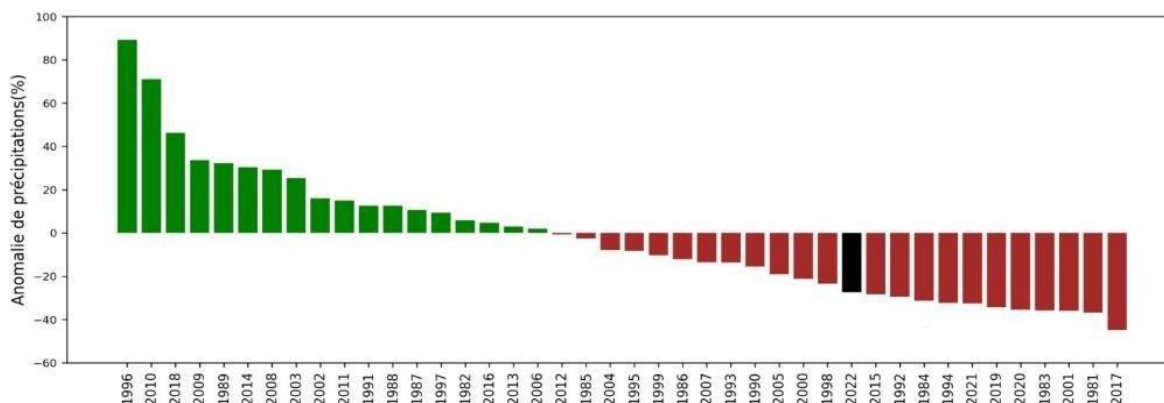
Le réchauffement climatique peut modifier les conditions météorologiques qui favorisent les chutes de neige. Par exemple, des températures plus chaudes peuvent entraîner une plus grande instabilité atmosphérique, ce qui favorise les précipitations sous forme de pluie plutôt que de neige.

L'année 2022 représente la quatrième année consécutive déficitaire en Pluviométrie. L'écart relatif par rapport à la normale des précipitations annuelle a avoisiné les -27% (**Figure 10**). Les quatre dernières années (2019-2022) ont affiché un déficit moyen d'environ-32% qui est le plus important depuis 1981 devant les -22% des quatre années consécutives de 1998 à 2001.

**Cumul annuel des précipitations au niveau national**

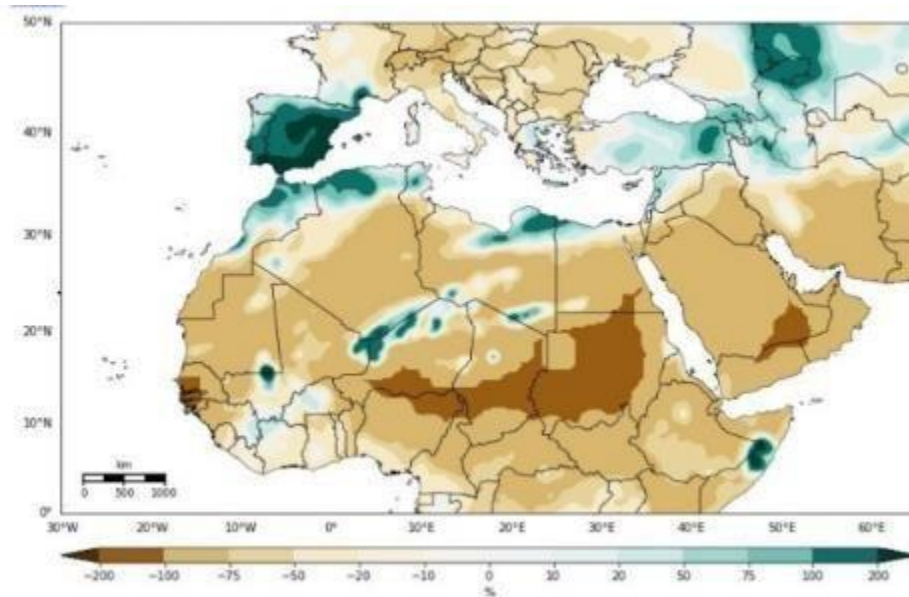


**Tri descendant des anomalies des précipitations au niveau national**



**Figure 10:**a) Courbe d'Evolution temporelle de la pluviométrie annuelle nationale ; la ligne orange représente la normale climatologique pour la période 1981-2010. b) Courbe de classement des écarts relatifs du cumul pluviométrique annuel par rapport à la normale climatologique 1981.

Le déficit pluviométrique a marqué l'ensemble des mois de l'année 2022 hormis 1 mois de mars et le mois de décembre. Cet égard, on signale que durant le mois de mars, le Maroc a connu un excédent pluviométrique dépassant les 100% sur le nord-ouest du royaume et les côtes atlantiques centrent entre Agadir et Tiznit (**Figure 11**).



**Figure 11:** Anomalie des précipitations du mois de Mars 2022. Source de données : Réanalyses ERA5 - période de référence 1981-2010

Enfin, le réchauffement climatique peut également avoir un impact sur les phénomènes météorologiques tels que les tempêtes de neige. Les changements dans les schémas météorologiques peuvent influencer la fréquence et l'intensité de ces événements, ce qui peut entraîner des variations dans la quantité de neige accumulée.

Il est important de noter que les effets spécifiques peuvent varier en fonction de la région géographique. Certaines régions pourraient connaître une augmentation temporaire de la quantité de neige due à des conditions météorologiques spécifiques, mais à long terme, les tendances indiquent une diminution générale de la quantité de neige due aux changements climatiques.

## Chapitre 2: La Télédétection

La télédétection est une discipline scientifique qui s'intéresse aux méthodes d'acquisition des informations permettant d'observer et d'analyser des propriétés de la surface de la Terre à distance. Dans la pratique, le terme télédétection est réservé à l'observation de la Terre au moyen d'instruments embarqués à bord de satellite, d'avions, de drones ou de toute autre plateforme aéroportée.

Cette technique de surveillance présente plusieurs avantages, notamment la capacité à couvrir de vastes étendues géographiques, à détecter des changements survenant au fil du temps et à fournir des informations objectives et quantifiables. La télédétection est également utilisée en combinaison avec d'autres sources de données, telles que les systèmes d'information géographique (SIG), pour une analyse et une prise de décision plus approfondies.

Grâce aux capteurs embarqués, il est possible d'enregistrer des rayonnements énergétiques réfléchis ou émis par la Terre. Cette énergie provient du Soleil (télédétection passive) comme elle peut être émise par le capteur lui-même (cas des radars).

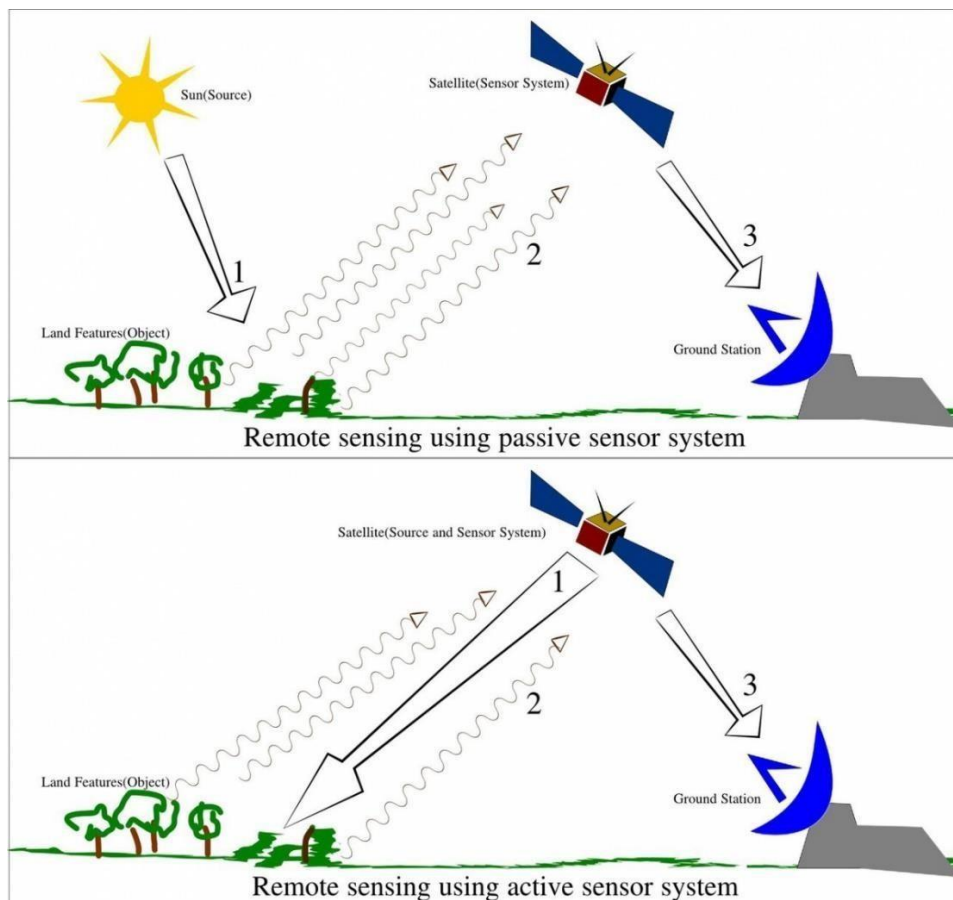


Figure12:Schéma des processus de télédétection passive (en haut) et active

Le rayonnement du Soleil vient illuminer la surface de la Terre (1). Le sol mais également l'atmosphère réfléchit une partie de ce rayonnement vers l'espace (2) dont une partie de ce rayonnement est réémise sous forme mais il émet également en permanence un rayonnement thermique. Ce rayonnement est mesuré par l'instrument embarqué dans le satellite qui renvoie ces informations aux stations terriennes (3). Si l'instrument est de type actif (radar, télémètre laser,...), il émet un rayonnement (1) qui est en partie renvoyé (2) puis analysé par l'instrument à bord du satellite.

Les capteurs utilisés permettent bien sûr une observation dans le domaine du visible, comme le ferait notre œil, mais aussi dans d'autres domaines du spectre électromagnétique, élargissant par là le champ des propriétés observable

Ainsi, il est possible de distinguer par exemple la végétation arborée de la végétation herbacée, différentes cultures en champs, diverses formes de bâti, d'estimer l'humidité du sol, de suivre l'état phénologique des plantes, de détecter des dégazages illégaux en mer ou de mesurer des mouvements de terrain.

## 4 Les types de résolution en Télédétection:

Les capteurs satellitaires présentent différentes capacités techniques regroupées sous la dénomination de « résolutions ». On distingue principalement 4 types de résolution en détection passive : spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle. Elles fonctionnent comme un balancier dans lequel un équilibre doit toujours être respecté : il n'existe pas (encore) de satellite unique possédant de très bonnes résolutions spatiale ET spectrale ET radiométrique ET temporelle. C'est pour cela que l'on développe des constellations de satellites permettant de pallier chacune des limitations.

- ✓ **La résolution spatiale** est, par définition, la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Elle est également définie (par abus de langage, accepté de tous) comme étant la taille du pixel. On notera que la distinction entre ces 2 termes dans le cas de la détection active est plus importante.
- ✓ **La résolution spectrale** est la capacité du satellite à discriminer les signaux de différentes longueurs d'ondes. Plus la bande du capteur est fine, plus sa résolution spectrale est bonne. Ainsi le nombre de bandes du capteur, bien que important pour la discrimination des signaux, n'est pas le seul facteur à prendre en compte pour caractériser la résolution spectrale.

- ✓ **La résolution radiométrique** est la capacité du capteur à discriminer des petites variations d'énergie électromagnétique. C'est le nombre de bits utilisés pour enregistrer l'image qui régit le nombre maximum de niveaux d'intensités disponibles.
- ✓ **La résolution temporelle** du capteur correspond à son temps de revisite. Cette résolution peut être associée au temps que met le satellite pour repasser au-dessus de la même zone, mais en réalité elle est nettement améliorée par la capacité du satellite à dépointer (shifting) (à regarder sur les côtés, devant, derrière ...).

## 5 Les domaines d'application :

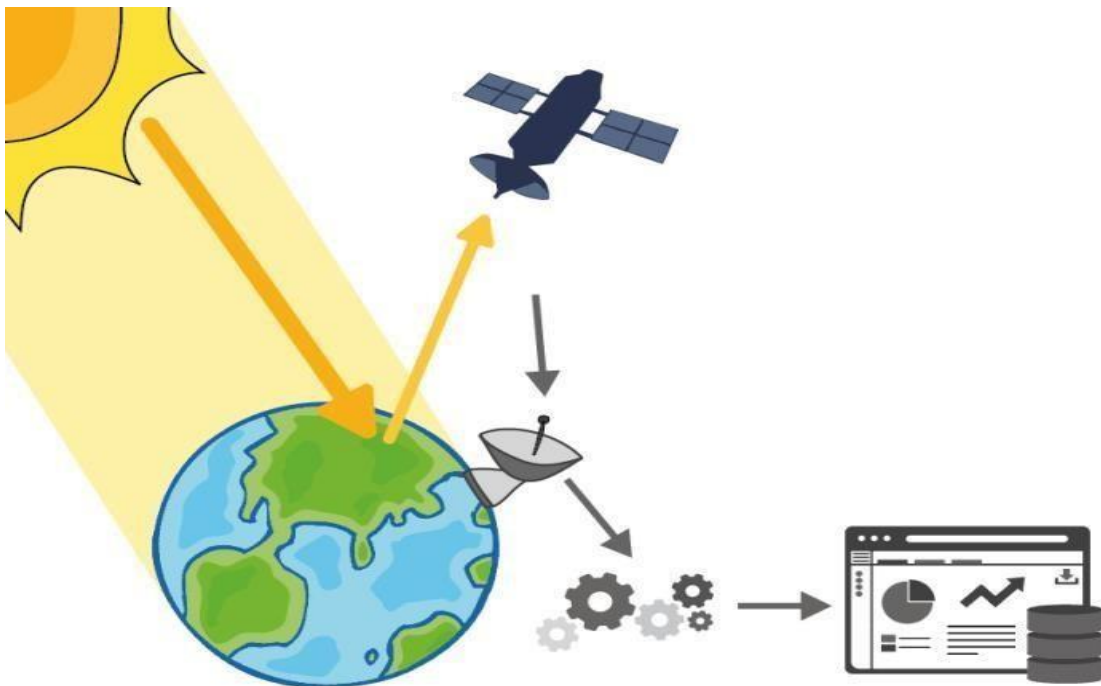
Les principaux domaines d'application de la télédétection sont les suivants:

- **Observation de la Terre** : La télédétection permet de surveiller l'environnement terrestre à grande échelle. Elle est utilisée pour cartographier les caractéristiques géographiques, telles que les forêts, les cours d'eau, les zones urbaines, les surfaces enneigées (...), les états de l'atmosphère (météo). Elle est également utilisée pour le suivi des changements (dynamiques) climatiques, la déforestation, l'évolution des zones côtières, etc.
- **Agriculture** : La télédétection est utilisée pour surveiller les cultures, estimer les rendements, détecter les maladies ou les stress hydriques, optimiser l'utilisation des ressources agricoles, etc.
- **Gestion des ressources naturelles** : Elle est utilisée pour la cartographie des ressources minérales, la surveillance des ressources en eau, l'estimation des stocks de bois, etc.
- **Gestion des catastrophes naturelles** : La télédétection permet de surveiller les ouragans, les séismes, les inondations, les feux de forêt,..., et d'aider aux opérations de secours et de gestion des crises.
- **Planification urbaine** : Elle est utilisée pour la cartographie des zones urbaines, la surveillance de l'expansion urbaine, l'analyse des infrastructures, etc.
- **Surveillance océanique** : La télédétection est utilisée pour suivre les courants océaniques, surveiller les températures de surface de la mer, détecter les pollutions marines, etc.



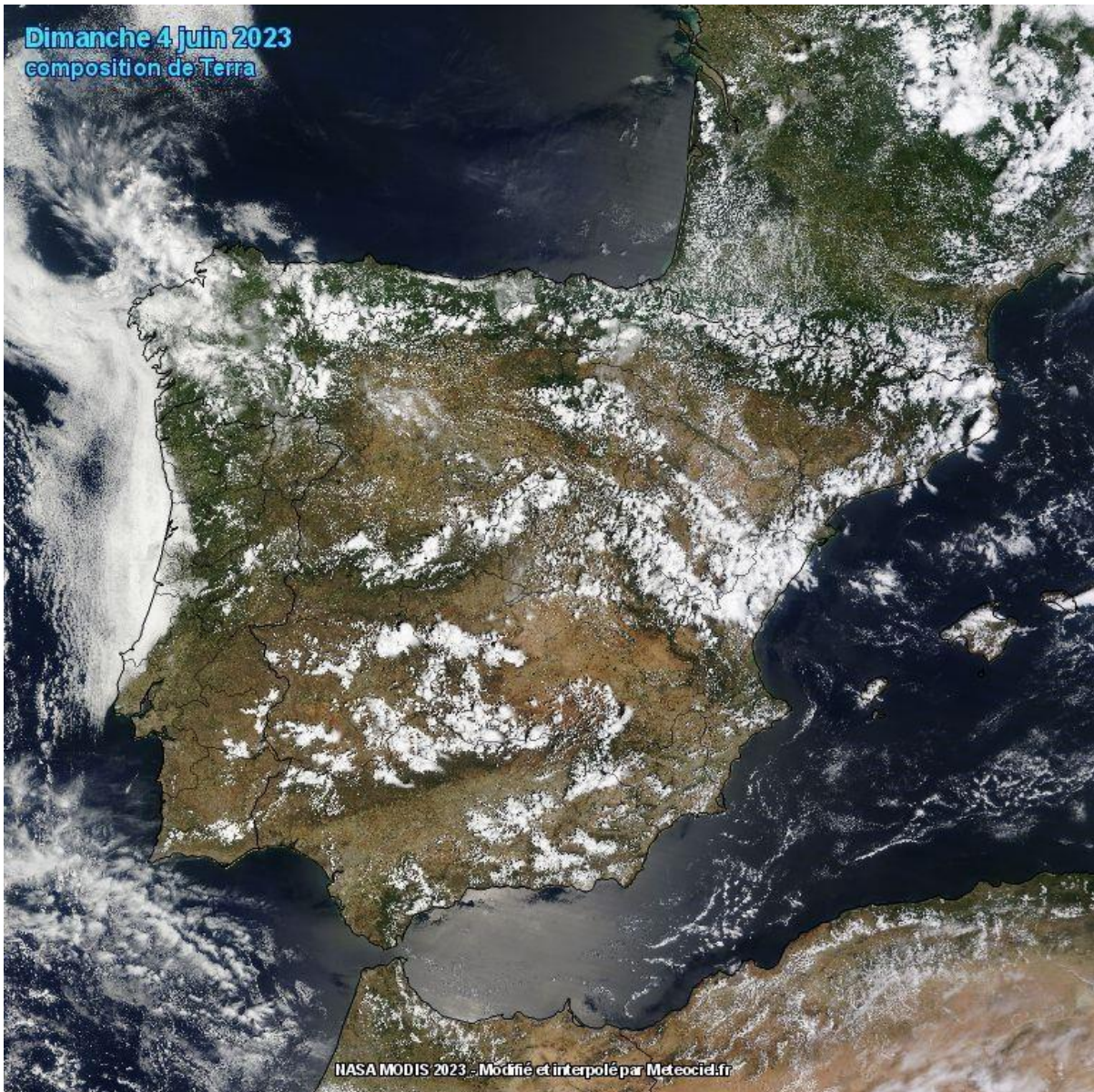
## 6 Les données de la Télédétection:

La télédétection permet d'obtenir des données à grande échelle et à intervalles réguliers, ce qui facilite la surveillance et l'analyse des changements sur une longue période. Elle joue un rôle essentiel pour étudier et surveiller différents phénomènes et contribue à notre compréhension de l'environnement et des processus naturels. Les données collectées sont ensuite traitées pour produire des images et des cartes qui peuvent être utilisées dans la prise de décisions dans de nombreux domaines.



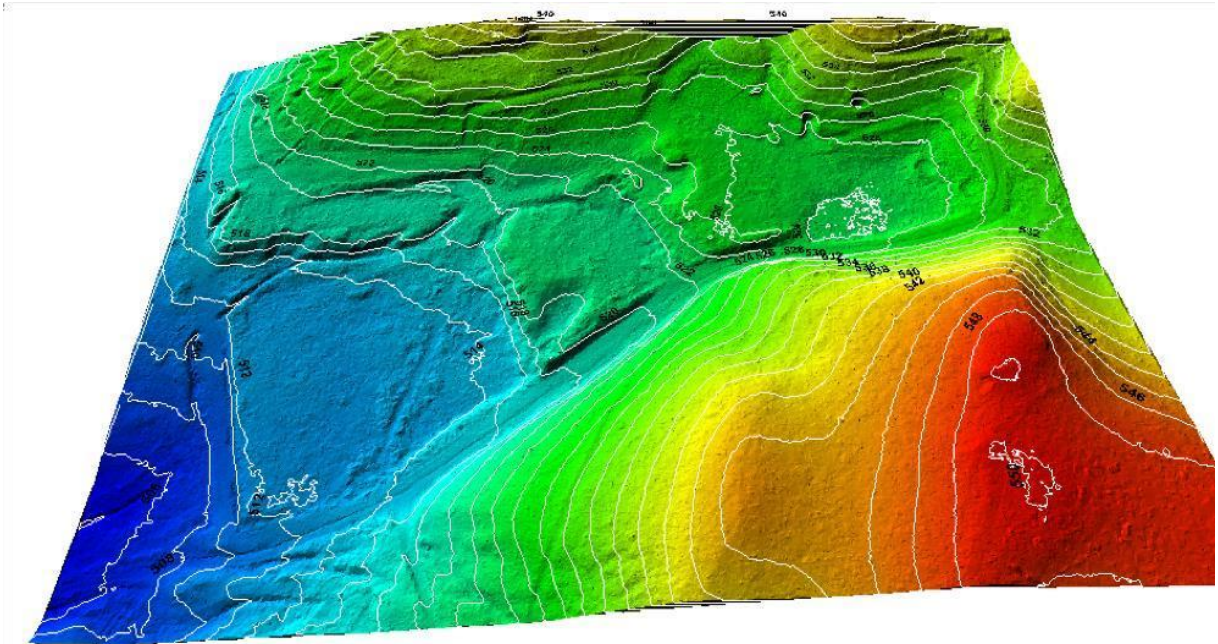
Les données utilisées dans la télédétection peuvent être de différents types, notamment :

**Les images satellites** : ces images sont obtenues à partir de satellites en orbite autour de la Terre. Les satellites peuvent collecter des images à haute résolution, qui permettent de voir des détails très fins de la surface terrestre.



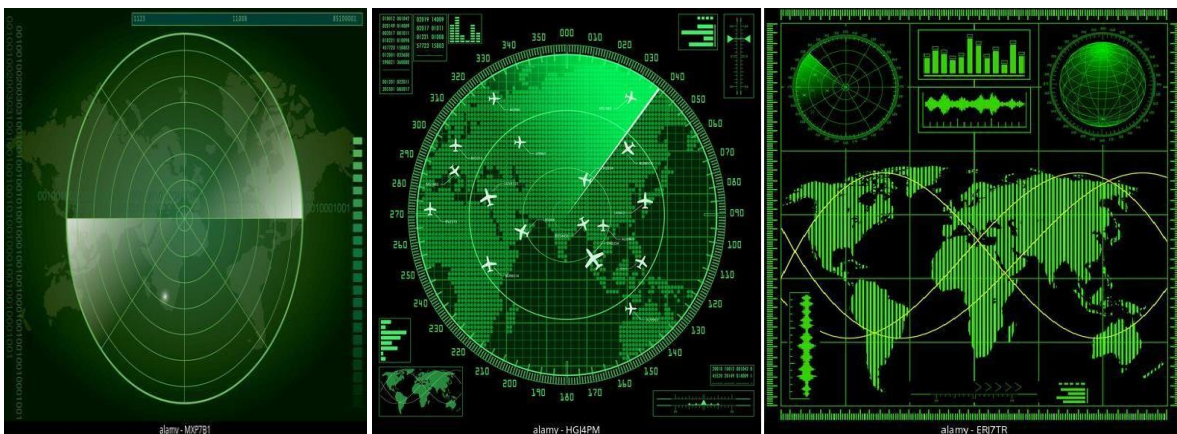
**Figure13:** L'image provient du satellite défilant Terra faisant partie du programme MODIS de la NASA. La résolution des photos prises est importante (1 pixel = 250m environ) et permet de faire des zooms assez poussés

**Les données Lidar :** cette technique utilise des lasers pour mesurer la distance entre le capteur et la surface de la Terre. Les données Lidar peuvent être utilisées pour produire des modèles numériques de terrain (MNT) et des cartes topographiques.



**Figure 14:** Vue détaillée du secteur de l'ancienne mine de Rophin (lidar).  
<https://zatu.org/donnees-lidar/>

**Les données Radar :** cette technique utilise des ondes radar pour mesurer les propriétés de la surface de la Terre, notamment l'humidité du sol et la hauteur des végétations.



**Figure15:** Écran radar vert avec carte du monde.  
([https://img.freepik.com/vecteurs-premium/ecran-radar-vert-carte-du-monde-piste-position-geographique-arriere-plan-scientifique-technologique\\_752899-424.jpg?w=740](https://img.freepik.com/vecteurs-premium/ecran-radar-vert-carte-du-monde-piste-position-geographique-arriere-plan-scientifique-technologique_752899-424.jpg?w=740))

**Les données optiques :** ces données sont obtenues à partir de capteurs optiques, qui mesurent la réflexion de la lumière visible et infrarouge par la surface de la Terre.

**Les données thermiques** : ces données sont obtenues à partir de capteurs qui mesurent la température de la surface de la Terre.

Toutes ces données sont ensuite traitées à l'aide de logiciels de traitement d'images pour produire des cartes et des images qui peuvent être utilisées pour étudier et surveiller différents phénomènes, notamment les surfaces enneigées, la végétation, l'occupation des sols, les mouvements de terrain, les changements climatiques et les phénomènes météorologiques.

## 7 Les indices de la Télédétection :

Les indices sont des paramètres qui sont calculés à partir des données collectées par les capteurs. Ces indices peuvent être utilisés pour caractériser différents phénomènes sur la surface terrestre, tels que la végétation, les surfaces enneigées, les changements d'occupation des sols, etc.

**Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** : cet indice est utilisé pour évaluer la quantité de végétation sur la surface terrestre. Il est basé sur la mesure de la réflectance de la lumière dans le spectre visible et proche infrarouge. Plus la quantité de végétation est importante, plus la valeur de l'indice est élevée.

La formule:  $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$

**Indice de l'eau normalisé (NDWI)** : cet indice est utilisé pour détecter la présence d'eau sur la surface terrestre, notamment dans les zones humides, les rivières et les lacs. Il est basé sur la mesure de la réflectance de la lumière dans le spectre infrarouge.

La formule:  $NDWI (GAO) = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$

Pour extraire la neige, plusieurs indices peuvent être utilisés, en fonction des objectifs et des contraintes spécifiques de chaque situation. Voici quelques indices couramment utilisés

**Indice de la neige (SNOW Index)** : Cet indice est souvent utilisé pour détecter la présence de neige dans les images satellite. Il repose sur les propriétés spectrales de la neige, qui réfléchit fortement la lumière dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge proche. L'indice SNOW est calculé en utilisant différentes bandes spectrales et permet de distinguer la neige des autres types de surface. Formule:  $NDSI = (Band5 - Band6) / (Band5 + Band6)$

**Indice de différence de température (Difference Temperature Index - DTI) :** Cet indice exploite la différence de température entre la neige et les autres surfaces environnantes. La neige a tendance à être plus froide que les autres surfaces, ce qui permet de la distinguer en utilisant des capteurs infrarouges thermiques. **La formule:  $DTI = T11 - T12$**

[**T11** représente la température de la surface terrestre mesurée dans la bande spectrale infrarouge thermique T11; **T12** représente la température de la surface terrestre mesurée dans la bande spectrale infrarouge thermique T12].

**Indice de composition spectrale de la neige (Spectral Snow Index) :** Cet indice se base sur les caractéristiques spectrales spécifiques de la neige, telles que la faible absorption dans l'infrarouge moyen. Il utilise des bandes spectrales spécifiques pour détecter la présence de neige. **La formule:  $SSI = (R_{visible} - R_{infrarouge}) / (R_{visible} + R_{infrarouge})$**

**Indice de variation de couleur (Color Variation Index) :** Cet indice se concentre sur la variation de couleur entre la neige et les autres surfaces. Il utilise des algorithmes de traitement d'image pour quantifier la différence de couleur et détecter ainsi les zones de neige. **La formule:  $CVI = (RV - BV) / (RV + BV)$**

[**RV** représente la réflectance dans une bande spectrale rouge; **BV** représente la réflectance dans une bande spectrale bleue].

**Indice d'humidité de la neige (Snow Moisture Index) :** Cet indice est utilisé pour évaluer l'humidité de la neige, ce qui peut être important pour des applications telles que la prévision des crues. Il est basé sur la capacité de la neige à réfléchir les ondes électromagnétiques dans les micro-ondes. **La formule:  $SMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$**

[**NIR** représente la réflectance dans une bande spectrale proche infrarouge; **SWIR** représente la réflectance dans une bande spectrale infrarouge à ondes courtes]

Voici d'autres indices couramment utilisés :

**Indice de neige normalisée (NDWI - Normalized Difference Water Index) :** Cet indice se base sur la différence normalisée entre la réflexion du bleu et du proche infrarouge dans les images satellites. La neige a tendance à avoir une faible réflexion dans le bleu et une réflexion plus élevée dans le proche infrarouge, ce qui permet de l'identifier.

**La formule:  $NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR)$**

**L'indice de position (TPI)**: est utilisé en analyse topographique pour évaluer la position d'un point par rapport à ses voisins. Il se calcule en soustrayant l'élévation du point à la moyenne des élévations des points voisins. Cet indice permet de mettre en évidence les zones de relief élevé, les dépressions ou les pentes douces.

**La formule:  $TPI = \text{Élévation du point} - \text{Moyenne des élévations des points voisins}$**

**L'indice NDSTI (Normalized Difference Snow Temperature Index)** : est un indice utilisé pour détecter la présence de neige dans une image thermique. Il est basé sur la différence normalisée entre les températures de surface mesurées dans les bandes spectrales infrarouge moyen et thermique.

**La formule:  $NDSTI = (TIR - TIR\_Mean) / (TIR + TIR\_Mean)$ ,**

**Indice de végétation différenciée (DVI - Difference Vegetation Index)** : Cet indice est utilisé pour détecter les zones de neige fondante. Il se base sur la différence entre la réflexion du proche infrarouge et du rouge, où la neige fondante a tendance à avoir une réflexion plus élevée dans le proche infrarouge.

**Indice de lumière réfléchi (LRI - Reflectance Index)** : Cet indice mesure la différence entre la réflexion dans le rouge et le bleu, ce qui peut aider à distinguer la neige des autres types de surfaces.

**Indice de Densité de Neige (Snow Grain Size Index - SAGI)**: Cet indice est utilisé pour estimer la taille des grains de neige. Des valeurs plus élevées de SAGI indiquent une neige à grains fins, tandis que des valeurs plus faibles indiquent une neige à grains plus gros.

**Formule :  $SAGI = (Band1 + Band2) / (Band3 + Band4)$**

Ces indices sont généralement calculés à partir d'images satellites ou aériennes, et ils permettent d'identifier les zones couvertes de neige. Cependant, il est important de noter que la précision de ces indices peut varier en fonction des conditions météorologiques, de l'heure de la journée et d'autres facteurs environnementaux.

## 8 Les capteurs de la télédétection :

Un capteur dans le domaine de la télédétection spatiale, est un instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable.

Les différents types de capteurs utilisés dans le domaine de la télédétection spatiale, sont les suivants:

- **capteur actif:** capteur auquel est incorporé ou associé un émetteur qui scanne la scène dans la bande spectrale du récepteur. Le radar et le lidar (à rétrodiffusion) sont des exemples de capteurs actifs.
- **capteur passif:** capteur qui reçoit une énergie émise sans que lui-même irradie la scène. Un appareil photographique sans flash est un capteur passif
- **capteur de luminescence :** capteur actif dans lequel la réception a lieu dans une bande spectrale distincte de celle de l'émission.
- **capteur d'orientation:** appareil qui mesure des angles ou des vitesses angulaires de déplacement entre les axes d'un engin spatial et des axes de référence. Selon la nature des grandeurs mesurées, on distingue notamment : les capteurs gyroscopiques, les capteurs optiques tels que les capteurs d'horizon, les capteurs solaires, les capteurs stellaires. On trouve aussi " capteur d'attitude ", qui n'est pas recommandé.
- **capteur en peigne:** capteur dont le détecteur est constitué par de nombreuses cellules détectrices alignées qui reçoivent simultanément l'énergie radiative en provenance de la scène. Le balayage selon une direction orthogonale à l'alignement des cellules détectrices peut être réalisé par le déplacement du vecteur ou, par exemple, dans le cas d'une plateforme d'observation géostationnaire, être fourni par un séquenceur incorporé au capteur.
- **capteur solaire:** dispositif qui reçoit le rayonnement solaire et en transforme l'énergie en électricité

Les satellites fournissent des données précieuses pour la surveillance de l'environnement à l'échelle mondiale. Les données sont utilisées pour suivre les changements climatiques, les phénomènes météorologiques extrêmes, les feux de forêt, les inondations et les sécheresses, ainsi que pour surveiller la santé des écosystèmes terrestres et marins. Les données sont également utilisées pour la planification de l'utilisation des terres, l'agriculture, la surveillance de la pollution et la gestion des ressources en eau.

Les satellites **NOAA-AVHRR**, **TERRA-MODIS** et **SPOT VEGETATION** sont utilisés pour la surveillance de l'environnement à l'échelle mondiale.

Voici des informations sur ces satellites et leurs données :

Le satellite **NOAA-AVHRR** (Advanced Very High Résolution Radiomètre) a été lancé en 1978 et fonctionne depuis lors. Les données de l'AVHRR sont utilisées pour surveiller les températures de surface de la mer, la couverture nuageuse, la végétation, la glace de mer, la neige, les feux de forêt et la qualité de l'air. Les données de l'AVHRR sont disponibles depuis 1981.

Le satellite **TERRA-MODIS** (Modérâtes Résolution Imaging Spectroradiomètre) a été lancé en 1999 et est le premier satellite de la mission Earth Observing System (EOS) de la NASA. Les données de MODIS sont utilisées pour surveiller la température de surface, la couverture nuageuse, la végétation, la qualité de l'air, la glace de mer, la neige et les feux de forêt. Les données de MODIS sont disponibles depuis 2000.

Le satellite **SPOT VEGETATION** est un système de surveillance de la végétation lancé en 1998. Les données de SPOT VEGETATION sont utilisées pour surveiller l'activité végétale, la couverture nuageuse, la neige, la glace de mer, la température de surface et la qualité de l'air. Les données de SPOT VEGETATION sont disponibles depuis la fin des années 1990 et sont livrées avec une résolution de 1 km. .

Le programme **Landsat** est une série de satellites d'observation de la Terre développés par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des États-Unis. Le programme a été lancé en 1972 avec le lancement du satellite Landsat 1, et jusqu'à présent, neuf satellites Landsat ont été mis en orbite (Landsat 1 à 9).



Les satellites **Landsat** sont principalement utilisés pour collecter des données et des images satellitaires à des fins d'observation de la Terre, en particulier pour surveiller les ressources naturelles, les changements environnementaux et les phénomènes géologiques. Chaque satellite est équipé d'instruments de télédétection qui capturent des images multi spectrales et infrarouges de la surface terrestre.

Voici une brève description de chaque satellite Landsat :

**Landsat 1** : (Landsat-A) : Lancé en 1972, il était principalement utilisé pour démontrer la faisabilité de l'imagerie satellitaire de la Terre à des fins d'observation et de surveillance.

**Landsat 2** : (Landsat-B) : Lancé en 1975, il a amélioré les capacités de télédétection et a permis d'obtenir des images plus détaillées de la Terre.

**Landsat 3** : (Landsat-C) : Lancé en 1978, il a poursuivi la mission d'observation de la Terre et a introduit de nouvelles améliorations technologiques.

**Landsat 4** : Lancé en 1982, il a marqué une transition vers une nouvelle génération de capteurs et a introduit des améliorations significatives en termes de résolution et de capacités de télédétection.

**Landsat 5** : Lancé en 1984, il a été en service pendant près de 29 ans, fournissant des données continues et précieuses sur les ressources terrestres et les changements environnementaux.

**Landsat 6** : Lancé en 1993, ce satellite n'a pas réussi à atteindre l'orbite en raison d'une défaillance de la fusée porteuse.

**Landsat 7** : Lancé en 1999, il a introduit des améliorations majeures en termes de résolution spatiale et spectrale des images, ainsi que la capacité de fournir des données de correction atmosphérique.

**Landsat 8** : (Landsat Data Continuity Mission - LDCM) : Lancé en 2013, il a poursuivi la mission de collecte de données Landsat et a fourni des images de haute qualité avec une résolution améliorée.

**Landsat 9** : Lancé le 27 septembre 2021, il est le dernier satellite de la série Landsat. Il est conçu pour fournir des données continues et précieuses sur l'environnement terrestre, en complément des satellites précédents.

Ces satellites Landsat ont joué un rôle crucial dans la surveillance de la Terre et ont permis de suivre les changements environnementaux, de gérer les ressources naturelles et d'effectuer des études scientifiques à grande échelle.

Le **MERIS** (Medium Résolution Imaging Spectromètre) était un instrument embarqué à bord du satellite ENVISAT (Environnemental Satellite) de l'Agence spatiale européenne (ESA). ENVISAT a été lancé en 2002 et a fonctionné jusqu'en 2012, fournissant des données précieuses sur l'environnement terrestre. Le MERIS était un spectromètre d'imagerie à moyenne résolution conçu pour mesurer la réflectance de la Terre dans différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Il couvrait une large gamme de longueurs d'onde, allant du bleu visible à l'infrarouge proche, ce qui permettait de collecter des informations sur la composition chimique de la surface terrestre, la turbidité de l'eau, la végétation, les nuages.

Les données collectées par le MERIS ont été utilisées dans de nombreux domaines de recherche, tels que la surveillance de la qualité de l'eau, l'étude des changements climatiques, la gestion des ressources côtières et la surveillance de la végétation terrestre. Cependant, depuis l'arrêt de fonctionnement d'ENVISAT en 2012, le MERIS n'est plus opérationnel.

Les satellites Sentinel-1 et Sentinel-2 font partie de la série de satellites d'observation de la Terre du programme Copernic us, une initiative de l'Union européenne en collaboration avec l'Agence spatiale européenne (ESA).

**Sentinel-1**: Le satellite Sentinel-1 est conçu pour fournir des données radar à synthèse d'ouverture (SAR) qui permettent d'observer la Terre de jour comme de nuit, quelle que soit la couverture nuageuse. Il offre des informations précieuses sur la surveillance des océans, la gestion des catastrophes naturelles, le suivi des changements environnementaux, la cartographie des terres et bien plus encore. Le système Sentinel-1 comprend deux satellites identiques en orbite polaire, permettant une couverture globale et une fréquence de revisite élevée.

**Sentinel-2** : Le satellite Sentinel-2 est équipé d'un instrument multi spectral qui fournit des images optiques haute résolution de la Terre. Il observe la surface terrestre dans différentes longueurs d'onde, ce qui permet de cartographier et de surveiller les terres émergées, les zones côtières et les îles, les cours d'eau et les lacs, les zones de végétation, etc. Il aide également à surveiller les changements environnementaux, à gérer les ressources naturelles, à soutenir l'agriculture de précision et à suivre les catastrophes naturelles.

Les satellites **Sentinel-1 et Sentinel-2** sont des composants essentiels du programme Copernicus, fournissant des données gratuites et accessibles à tous pour soutenir la prise de décision dans de nombreux domaines, tels que la gestion des ressources, la protection de l'environnement et la réponse aux urgences.

**Tableau : Exemples des satellites et leurs caractéristiques:**

Satellites	Agence	Année de lancement	Type de capteur	Fauchée	Résolution spatiale (m)	Bandes spectrales	Fréquence d'acquisition
<b>PLÉIADES 1 et 2</b>	CNES (Centre national d'études spatiales)	2011 / 2012	Optique	20 km	PA <sup>1</sup> : 0,7 (ré échantillonné à 0,5) / MS <sup>2</sup> : 2,8	Visible et proche infrarouge	2 jours
<b>SPOT 6 et 7</b>	CNES (Centre national d'études spatiales)	2012 / 2014	Optique	60 km	PA : 1,5 / MS : 6	Visible et proche infrarouge	1 à 3 jours
<b>SENTINEL 1A et 1B</b>	ESA (European Space Agency)	2014 / 2016	Radar	4 modes d'acquisition : > fauchée de 400 km / résolution de 20 x 40 m > fauchée de 250 km / résolution de 5 x 20 m > fauchée de 100 km / résolution de 5 x 5 m > fauchée de 80 km / résolution de 5 x 5 m		Bande C	3 jours (à l'équateur)
<b>SENTINEL 2A et 2B</b>	ESA (European Space Agency)	2015 / 2017	Optique	290 km	MS : 10, 20, 60	Visible et proche infrarouge (13 bandes)	5 jours
<b>LANDSAT 8</b>	UGSA (USA Geological Survey) / NASA (National Aeronautics and Space Administration)	2013	Optique	180 km	PA : 15 / MS : 30	CA <sup>3</sup> , visible, proche et moyen infrarouge	16 jours

# Chapitre3 : Suivre Les surfaces enneigées par la télédétection

## INTRODUCTION

La cryosphère sensu lato regroupe l'ensemble des composantes du système Terre où l'eau est présente à l'état solide. On la trouve dans l'atmosphère, à la surface des continents (neige, glaciers, calottes, glace de rivière et de lac) et des océans (banquise), et dans les sols (pergélisol). La cryosphère occupe une place importante dans les débats scientifiques actuels, d'une part pour ce qui concerne son rôle d'indicateur et d'acteur des changements climatiques à l'échelle globale et, d'autre part, en tant que composante majeure du cycle hydrologique de nombreux bassins versants. Les enjeux sociétaux consistent en une meilleure quantification des ressources en eau associées à la cryosphère, de la contribution de la fonte des glaciers et calottes à l'élévation du niveau marin actuelle et future, ou encore en une meilleure compréhension des risques naturels (avalanches, chutes de séracs, ...).

Pour répondre à ces enjeux, la télédétection spatiale joue un rôle fondamental, complémentaire aux observations in-situ. En effet, depuis le lancement des premiers satellites d'observation de la Terre dans les années 1960-1970, les moyens d'observation se sont diversifiés, combinant données optique, radar, spectrométrie, lidar, et plus récemment la gravimétrie. Les performances des capteurs, en termes de résolutions spatiales, temporelles et spectrales, n'ont cessé de croître ce qui permet l'observation de la cryosphère sous de multiples facettes, de l'échelle locale à globale.

## 9 SUIVI DU COUVERT NIVAL

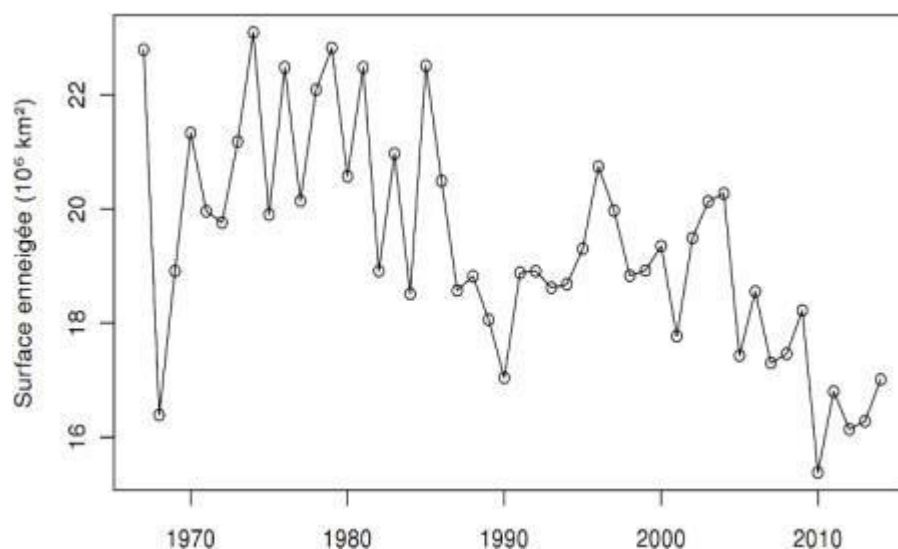
### 9.1 Variabilité spatio-temporelle de l'étendue du manteau neigeux

Chaque année la neige recouvre près du tiers des terres émergées du globe. Les variations de la superficie enneigée constituent un excellent indicateur de la variabilité et du réchauffement climatiques. En outre, la présence d'un manteau neigeux à la surface des continents modifie les conditions aux limites de l'atmosphère car la neige possède des propriétés réfléchissantes et isolantes uniques. Ainsi, la surface enneigée engendre des rétroactions climatiques ; par exemple la fonte de la neige de plus en plus précoce en Europe de l'Est a pour effet d'avancer le début de l'été en Europe de l'Ouest [4], ou encore la rétroaction température – fonte – albédo qui est à l'origine d'un réchauffement plus marqué

Aux pôles [5]. La première carte satellite de l'étendue du manteau neigeux fut réalisée en 1966 par la NOAA, Dé lors, la NOAA a produit une carte hebdomadaire de la surface enneigée de l'hémisphère Nord, constituant ainsi le jeu de données environnementales le plus long jamais obtenu par satellite (**Figure17**). La détection de la neige dans le domaine optique repose sur sa signature spectrale particulière : la neige est très réfléchissante dans le visible et peu réfléchissante dans le moyen infrarouge. Ce contraste de réflectance permet de la distinguer de la majorité des nuages dont la réflectance est généralement plus élevée dans le moyen infrarouge.

**MODIS** est un des capteurs les plus utilisés pour les applications hydro-climatiques. Il permet de disposer de cartes de l'enneigement à une résolution de 500 m à l'échelle globale tous les jours où les nuages sont absents à l'heure de l'acquisition (10h et 14h environ). Cette résolution spatio-temporelle est bien adaptée au suivi du manteau neigeux depuis l'échelle continentale jusqu'à celle des massifs montagneux [6].

Dans le domaine des micro-ondes actives, les images radar à SAR en bande L (1,2 GHz), C (5,3 GHz), X (9,6 GHz) et Ku (13,6 GHz) sont utilisées pour cartographier les étendues neigeuses « humides ». En effet, à ces fréquences, le signal radar ne pénètre pas le manteau neigeux en présence d'eau liquide à l'interface air/neige



**Figure 16:**Évolution de la surface enneigée moyenne (en millions de km<sup>2</sup>) au mois de mai dans l'hémisphère 534 Nord (1967-2014) établie à partir des cartes d'enneigement de la NOAA (mise à jour de Brown et Robinson, 2011)

## **9.1 Propriétés physiques de la neige**

### **9.1.1 Albédo**

Les réflectances mesurées par satellite (fraction de rayonnement réfléchi dans l'angle droit d'observation du satellite) nous renseignent sur les caractéristiques physico-chimiques de la neige, notamment l'albédo (fraction de rayonnement réfléchi sur l'intégralité de l'hémisphère, intégré sur l'ensemble du spectre solaire). Il existe deux méthodes principales pour quantifier l'albédo à partir des images multi spectrales. La plus simple calcule une régression entre les valeurs de réflectance par bande spectrale et des valeurs d'albédo mesurées in-situ. Cette méthode ne permet pas de considérer de manière précise les variations spectrales des propriétés optiques de la neige avec les caractéristiques physico-chimiques de celle-ci. La seconde méthode consiste à estimer les caractéristiques physico-chimiques de la neige de surface à partir des données de réflectance spectrale et à extrapoler ces valeurs au spectre complet à partir d'un modèle de transfert radiatif du manteau neigeux [14]. Cette méthode est utilisée pour le calcul de l'albédo de la neige dans les produits MOD10 à partir des observations MODIS [15]. Enfin, certains produits, comme le MCD43 issu du même capteur, utilisent plusieurs images acquises sous différents angles solaire et de visée afin de prendre en compte les variations angulaires de la réflectance dans le calcul de l'albédo [16].

### **9.1.2 Taille de grain**

La microstructure de la neige détermine en grande partie sa réflectance dans le proche et moyen infrarouge et dans les micro-ondes. Les réflectances optiques satellites permettent donc de suivre l'évolution de la surface spécifique de la neige, une variable en lien avec la taille des grains de neige. Les algorithmes d'estimation sont souvent basés sur l'utilisation d'une bande infrarouge qui est sensible à la surface spécifique et d'une ou plusieurs bandes du visible qui permettent de s'affranchir de l'influence de l'atmosphère. Les algorithmes se différencient par la relation entre la surface spécifique et la réflectance qui découle des approximations du transfert radiatif utilisées [17].

### **9.1.3 Température de surface**

L'observation dans le domaine de l'infrarouge thermique permet d'estimer la température de surface. La neige est un très bon absorbeur dans ce domaine ce qui en fait un excellent corps

noir, avec une émissivité proche de 0,98 et variant en fonction de la taille de grain et de la Tél. Dans ces conditions, il est possible d'atteindre une précision de mesure de l'ordre de 2 K à condition de corriger la contribution atmosphérique. Le caractère absorbant implique aussi que l'énergie émise par la neige provient d'une couche superficielle de quelques micromètres, appelée « peau ». La température ainsi mesurée correspond exactement à celle qui apparaît dans les équations du bilan d'énergie de surface des modèles de prévision numérique du temps, ce qui est un atout important. En revanche, la faible inertie thermique de cette « peau » conduit à de fortes variations de la température au gré de la turbulence ou des nuages, si bien que l'observation satellite n'est représentative que de l'instant précis de l'acquisition. La revisite des satellites est insuffisante pour échantillonner ces variations, ce qui rend imprécises les statistiques journalières. De plus, le signal ne provient de la surface qu'en condition de ciel clair, ce qui biaise les climatologies mensuelles. Toutefois, dans une étude récente en Antarctique, la haute répétitivité des observations due à la convergence des orbites quasi polaires et à la faible présence nuageuse a permis d'obtenir des séries quasi horaires. Ces travaux ont montré l'importance de modéliser les couches atmosphériques stables pour prédire la température de surface [18] .

#### **9.1.4 Hauteur de neige, équivalent en eau et teneur en eau liquide**

La hauteur de neige est une variable clé pour le suivi du manteau neigeux en climatologie, en hydrologie et en glaciologie car elle permet d'estimer son équivalent en eau qui est le produit de la densité moyenne du couvert nival par sa hauteur. Diverses techniques ont émergé pour établir des cartes de hauteur de neige très précises par stéréoscopie ou par lidar, depuis un drone, un hélicoptère ou un avion. Les capteurs satellites optiques à très haute résolution spatiale laissent entrevoir la possibilité de déterminer la hauteur de neige depuis l'espace par stéréoscopie. Plusieurs auteurs [7] ont réalisé un premier test avec les satellites Pléiades dans un bassin versant pyrénéen et ont cartographié la hauteur de neige à 2 m de résolution spatiale avec une erreur aléatoire d'environ 50 cm en chaque pixel. Les radars permettent d'estimer les épaisseurs de neige non humide par différence du signal de phase en bande X ou par décomposition polarimétrique en bande C [8]. La fréquence la plus adaptée pour pénétrer la neige et restituer son équivalent en eau est la bande Ku [9] mais aucun capteur satellite SAR ne la possède actuellement. Dans le cas de la banquise, les propriétés isolantes de la neige ralentissent la croissance de la glace en l'isolant de l'air froid. A l'inverse, son fort albédo



Retarde la fonte de la glace en réfléchissant une grande partie du rayonnement solaire. L'épaisseur de neige à la surface de la banquise peut être estimée en combinant des données altimétriques [10]. En effet, le signal altimétrique en bande Ku pénètre la neige à l'inverse du signal en bande Ka (37 GHz) bloqué à la surface, ce qui par différences permet d'obtenir des cartes de neige sur tout l'Arctique. Une méthode similaire a été développée au lac Baïkal pour estimer l'épaisseur de la couverture neigeuse sur la glace à partir des observations micro-ondes passives des altimètres et du radiomètre spatial SSM/I [11]. La quantité d'eau liquide présente dans un couvert neigeux affecte non seulement les mécanismes de métamorphisme, mais aussi ses propriétés diélectriques qui influent sur le signal radar. La teneur en eau liquide (Télé) est généralement exprimée sous forme d'un pourcentage massique ou volumique. Une méthode a été proposée en bande C par [12], afin de restituer la Télé de surface pour des couverts neigeux humides dans les Alpes françaises par inversion du signal radar. L'application a été améliorée par (Longépé et autres auteurs) [13] et couplée avec le modèle physique de métamorphisme de la neige SURFEX-Crocus développé par Météo-France.

## **10 – Matrice des données, approches et indices en nivologie :**

Cette matrice présente une synthèse des éléments pertinents à considérer pour toute étude de suivi des surfaces enneigées par télédétection. Elle se base sur un choix judicieux et lecture détaillée des principaux travaux réalisés dans la thématique. Les auteurs mentionnés dans ces articles ont exploré différentes méthodologies et ont utilisé divers indices calculés pour traduire les propriétés de la couverture neigeuse. Ils ont également utilisé une variété de données, telles que des images satellites, des données Lidar ou des modèles numériques d'élévation.

Toutes études reconnaissent l'efficacité de la télédétection pour le suivi des surfaces enneigées offrant ainsi des outils précieux pour la recherche scientifique et les décisions en matière de gestion environnementale. Les auteurs ont pu quantifier la couverture neigeuse, analyser les variations spatiales et temporelles, et même étudier les processus de fonte et d'accumulation de la neige. Ces informations sont précieuses pour la compréhension des impacts du changement climatique, la gestion des ressources en eau et la prévision des risques naturels liés à la neige.

Des efforts continus dans ce domaine de recherche continuent d'explorer de nouvelles approches pour améliorer les techniques de suivi et mieux comprendre l'évolution des surfaces enneigées dans le contexte du changement climatique.

Auteurs	Titres de l'article	Géographie	Objectifs	Données	Indices	Méthodes	Propriétés recherchées	Résultats
Mohamed Wassim Baba et autres (1981-2019)	Évaluation de MERRA-2 et ERA5 pour modéliser la neige Équivalent en eau dans le Haut Atlas	la rivière Tensift au nord de la pente du Haut Atlas	L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre un schéma d'assimilation des données Sentinel-2 pour simuler la distribution spatiale de l'équivalent eau-neige et de la fonte des neiges dans le Haut Atlas sans données au sol	MERRA-2 et ERA5 ;MODIS (SCA); Des données météorologique ; La carte de la couverture terrestre; modèle numérique d'élévation DEM	NDSI	les données de couverture neigeuse MODIS, Calcul de la durée de la couverture neigeuse, qui représente le nombre de jours avec une couverture neigeuse, à partir des données de fraction de couverture neigeuse MODIS	la teneur en eau, la couverture de la neige	Les résultats montrent une bonne performance pour MERRA-2 et ERA5 en termes de reproduction l'état d'accumulation de neige pour la majorité des années d'eau, avec un biais plus faible en utilisant le forçage ERA5;Les données ERA5 sont environ quatre fois plus denses que les données MERRA-2, ce qui pourrait expliquer cette supériorité.
Moazzam et autres (1991-2021)	Tendance de la couverture neigeuse sous l'influence du changement climatique	Astore (L'ouest Himalayas) et Shigar (Karakoram région)	La surveillance des changements de la zone de couverture de neige et sa réponse aux variables climatiques est cruciale pour une gestion efficace des réservoirs d'eau.	Landsat annuelles moyennes entre 1991 et 2021,Les données ASTER GDEM, Les données du Climat Research Unit (CRU)	(NDSI	une plateforme de Cloud computing (Google Earth Engine),l'aide d'API JavaScript ou Python	La quantité du précipitation de la neige, surface de la couverture	Les résultats ont également indiqué que le SCA diminuait (-38,04 km <sup>2</sup> /an) entre 1991 et 2005 dans la région d'Astore car la température augmentait et les précipitations diminuaient, tandis que dans la même période, Shigar avait une tendance à la hausse
A.Boudhar et autres (2009)	Analyse à long terme de la superficie enneigée dans le Haut-Atlas marocain télédétection	Le Haut-AtlasMarocain	l'observation à long terme de la variabilité intra- et inter- annuelle des manteaux neigeux dans des régions peu accessibles où le réseau de stations météorologiques est déficient.	SPOT-4 et -5;des données d'interférométrie radar; Données SPOT-VÉGÉTATION	(SI) indice de la neige, Indice de neige modifié (MSI)	.Estimation des surfaces enneigées; Correction topographique	la dynamique spatiale et temporelle des zones enneigées	Du 7 au 18 janvier 2005, le SCA reste stable sur la plus haute altitude (>3400 m) alors qu'une diminution générale est observée sur les sections altitudinales inférieur. La superficie enneigée augmente considérablement du 22 février au 6 mars 2005 après une chute de neige et diminue par la suite jusqu'au 21 mars pendant une période de fonte des neiges

Goodarziun et autres, (2000 à 2020)	Impacts de l'aspect sur les caractéristiques de la neige en utilisant la télédétection	Ajichai :Nord Ouest de l'Iran	l'effet de l'exposition des pentes sur les propriétés de la neige; Analyser la tendance des données de 21 ans sur 6 paramètres .	Des données satellitaires: MOD10A1 est un produit qui utilise des images de MODIS; FLDAS( l'épaisseur de la neige en m) et (l'équivalent en l'eau). Google Earth Engine (GEE) CHIRPS ( précipitation )	NDSI :Normalized Difference Snow Index	Calcul des propriétés géophysique de la neige ,	la profondeur, la densité, la permittivité, et l'équivalent en eau de la neige la surface de couverture neigeuse, et les précipitations	La profondeur moyenne de neige sur la pente nord est de 13,06 mm et sur la pente sud est de 30,23 mm. le pourcentage moyen de superficie enneigée est de 18 % sur le versant nord et 15% sur les pentes sud. les précipitations moyennes sur la pente nord est de 114 mm et sur la pente sud est de 141 mm. La densité avec une moyenne d'environ 0,15. la permittivité de la neige dans cette région est varie de 1.15 à 1.4.
Lahoucine Hanich et autres (2017)	Hydrologie de la neige dans les montagnes de l'Atlas marocain	l'Atlas marocain	l'hydrologie de la neige dans les montagnes de l'Atlas au cours des vingt dernières années.	SPOT VEGETATION, MODIS	(MNDSI) ,(SWEI)	la télédétection optique	la hauteur de neige et le poids de neige, la densité, les températures min et max quotidiennes, les précipitations et l'épaisseur des chutes de neige	L'enneigement est caractérisé par une variabilité importante, avec une accumulation de neige en février-mars suivie d'une fonte précoce au printemps; l'épaisseur maximale dépasse 1 m voire 2 m (altitude> 3000 m) e.g. saison (2008-2009). Dans le Haut-Atlas, le bassin de la Rheraya connaîtra une diminution majeure du ruissellement de surface d'ici 2050, avec une réduction importante de l'accumulation de neige due à la diminution des précipitations et à l'augmentation de la température. L'impact de la NAO sur la couverture de neige (SCA) s'avère être le résultat de l'influence de la NAO sur la température.
Abbas Fayadun et autres (2017)	Hydrologie de la neige dans les régions de montagne méditerranéennes	les régions méditerranéennes	L'objectif de cet article est de passer en revue la littérature sur l'hydrologie de la neige dans les montagnes méditerranéennes afin d'identifier les connaissances existantes, les propriétés de la neige, l'hydrologie de la neige et l'hydro climatologie des montagnes	Observations au sol (stations météorologiques automatiques); données de réanalyse Mesures sur le terrain ; Stations météo automatiques, télédétection spatiale des produits; télécommande terrestre détection (Lidar, caméra)	indice de position (TPI);indice de température	Atmosphère méso échelle modèle(WRF); assimilation technique; réduction d'échelle ;spatial interpolation Indice de température modèle; régression analyse; modélisation de la masse du manteau neigeux et bilan énergétique	Temperature de la neige; l'épaisseur, la densité de la neige. la densité de la neige et l'équivalent en eau de la neige	l'épaisseur de la neige, la densité de la neige et l'équivalent en eau de la neige présentent une variance inter- et intra-annuelle élevée. De plus, le manteau neigeux est affecté par des taux de densification plus élevés par rapport aux autres régions climatiques.

Mohamed Wassim Baba et autres (2000 à 2018 )	Variations de l'équivalent d'eau de neige dans le Bassin versant d'Ourika (Maroc)	le bassin versant d'Ourika à Aghbalou	L'objectif de cette étude est d'évaluer la combinaison des données MERRA-2 avec un modèle de neige accumulée pour simuler et analyser la variabilité spatio-temporelle de l'équivalent en eau de neige (SWE) dans le bassin versant d'Ourika du 1er novembre 2000 au 1er avril 2018	Données météorologiques; MERRA-2; données MODIS;(LIDAR);DEM (modèle numérique d'élévation)	NDSI	SnowModel ; MicroMet (météorologique interpolation des données) EnBal (calculs du bilan énergétique) SnowPack (évolution de la profondeur de neige) et SnowTran-3D (transport par le vent)	la teneur en eau, la couverture de la neige, la dynamique de la neige, la hauteur de neige	SH est égal à 27,76 cm pour ERA5 simulations et 29,61 cm pour les simulations MERRA-2. Certaines saisons (p. ex., 2010 et 2017) le modèle n'a pas donné de bons résultats. Pour ces années, le RMSE est respectivement de 43,71 cm, 26,70 cm (ERA5), 26,29 cm, 34,93 cm (MERRA-2)
Mohamed Wassim Baba et autres ( 2018 )	Assimilation des données de Sentinel-2 dans une accumulation de neige Modèle dans le Haut Atlas du Maroc	le bassin versant de Rheraya dans les montagnes du Haut Atlas du Maroc	L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre un schéma d'assimilation des données Sentinel-2 pour simuler la distribution spatiale de l'équivalent eau-neige et de la fonte des neiges dans le Haut Atlas sans données au sol	Sentinel-2 ;Sentinel-2B ;l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift(ABHT) ;MERRA-2;MOD10A1 collection 6	NDSI,HSS (Heidke Skill Score)	Utilisation de SnowModel avec MERRA-2,Sentinel-2 et des observations in situ pour améliorer la modélisation de la couverture de neige. L'estimation avec les observations Sentinel-2,et la simulation de données synthétiques évalue l'efficacité de l'assimilation.	Température, précipitations, humidité relative, Hauteur de neige l'équivalent en eau de la neige	Il y avait un biais relativement faible dans les précipitations et la température de l'air antérieures, ce qui aurait pu entraîner une divergence dans la SWE postérieure. Pourtant, l'assimilation tend généralement à augmenter les précipitations et SWE . Cependant, il a diminué le SWE(l'équivalent en eau de la neige) dans la zone la plus élevée du bassin versant près du pic du Toubkal
Simon Gascoin et autres (2019)	Theia Snow collection : neige opérationnelle haute résolution couvrir les cartes des données Sentinel-2 et Landsat-8	les régions de montagne(les Alpes, les Pyrénées) et le Haut Atlas au Maroc.	Présentation d'une évaluation des produits de neige Theia à l'aide de mesures d'épaisseur de neige in situ, de cartes de neige à très haute résolution par ciel clair et d'un contrôle visuel	Sentinel-2(20m) ; Landsat-8 (30 m); MODIS ;s SPOT-6 et SPOT-7	NDSI	ils ont utilisé des images SPOT-6 et SPOT-7 avec une résolution de 1,5 m en panchromatique et 6 m en multi spectral (bleu, vert, rouge, proche infrarouge)	La couverture de neige; la teneur en eau liquide, la profondeur de la neige	le taux de faux positifs augmente également dans ces une façon d'atteindre un optimum à SD0 = 2 cm

## ***CONCLUSION***

---

La surveillance des surfaces enneigées par télédétection est un domaine de recherche et d'application prometteur qui bénéficie de nombreux travaux et études dans la littérature scientifique. Cette synthèse bibliographique a mis en évidence plusieurs avancées significatives dans l'utilisation de techniques de télédétection pour surveiller et évaluer les variations des surfaces enneigées à différentes échelles spatiales et temporelles.

Les études ont montré que les données obtenues à partir de capteurs à distance, tels que les images satellites et les lidars aéroportés, peuvent être utilisées pour estimer les caractéristiques physiques de la neige, telles que la profondeur, la densité, la température et l'albédo. Ces informations sont essentielles pour de nombreuses applications, y compris la gestion des ressources en eau, la prévision des avalanches, la surveillance du climat et la modélisation du bilan énergétique de la neige.

La télédétection offre également la possibilité de suivre les changements spatio-temporels des surfaces enneigées, en fournissant des mesures répétées sur une large zone géographique. Cela permet d'obtenir des séries temporelles de données sur la neige, ce qui facilite l'analyse des tendances, la détection des anomalies et la modélisation des processus dynamiques.

Cependant, malgré les progrès réalisés, il reste encore des défis à relever dans ce domaine. Parmi les principaux défis figurent la correction des effets atmosphériques, la détection des limites de la neige dans les zones de manteau neigeux partiel, l'estimation précise des caractéristiques de la neige dans les régions montagneuses et la validation des données obtenues à partir de capteurs à distance.

En conclusion, la synthèse bibliographique souligne l'importance croissante de la télédétection pour le suivi des surfaces enneigées. Les recherches futures devraient se concentrer sur le développement de méthodes améliorées de télédétection, la combinaison de différentes sources de données et la validation croisée des résultats obtenus. Cela permettra de mieux comprendre les processus liés à la neige et d'améliorer les prévisions et la gestion des ressources en eau dans les régions enneigées.

# Références bibliographiques

- [1] M. Peyron, «Les chutes de neige dans l'Atlas marocain,» pp. 238-239-241, 2018.
- [2] E. Ouali, «A. Etude de vulnérabilité et adaptation du Maroc face aux changements climatiques,» pp. 8,9, 2010.
- [3] H. TAHIRI, «Etude de la pluviométrie au Maroc,» 2012.
- [4] Cassou C. et C. J, «Disruption of the European climate seasonal clock in a warming world. Nature,» 2016.
- [5] Bony S. et D. J.L, «Processus régissant la sensibilité climatique.,» *La Météorologie*, pp. 56, 29-32., 2007.
- [6] G. S., H. O, J. L. et H. , «A snowcover climatology for the Pyrenees, » pp. 2337-2351, 2016.
- [7] Marti , Gascoin , Berthier , Pinel , Houet , Laffly «Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery.,» pp. 1361-1380, 2016.
- [8] Dedieu , Besic , Vasile , Mathieu , Durand , Gottardi. «Dry snow analysis in alpine regions using Radarsat-2 full polarimetric data, comparison with in-situ measurements,» 2014.
- [9] Rott H., Nagler T., Ripper E., Voglmeier K., Prinz R., Fromm R., Coccia A., Meta«Ku- and X-Band backscatter analysis and SWE retrieval for alpine snow,» 2014.
- [10] Guerreiro K., Fleury S., Zakharova E., Rémy F., Kouraev A, «Potential for estimation of snow depth on Arctic sea ice from CryoSat-2 and SARAL/AltiKa missions.,» pp. 186, 339-349., 2016.
- [11] Kouraev A., Shimaraev, Buharizin , Naumenko ,Créaux , Mognard, «Ice and snow cover of continental water bodies from simultaneous radar altimetry and radiometry observations,» pp. 29, 271-295, 2008.
- [12] Niang M., Dedieu ., Durand Y., Mérindol L., Bernier M., Dumont M.«New inversion method for snow density and snow liquid water content retrieval using C-band data from ENVISAT/ASAR alternating polarization in alpine environment,» pp. 636-642. , 2007.
- [13] Longépé N., Allain S., Ferro-Famil L., Pottier E., Durand Y., «Snowpack characterization in mountainous regions using C-Band SAR data and a meteorological model,» pp. 47, 2, 406-408, 2009.
- [14] Dumont M., Durand Y., Arnaud Y., Six D.. , «Variational assimilation of albedo in a snowpack model and reconstruction of the spatial mass-balance distribution of an alpine glacier,» pp. 58 (207), 151-164, 2012.

- [15] Klein A.G., Stroeve J, «development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS Instrument,» pp. 45-52, 2002.
- [16] Schaaf , Wang Z., Strahler «Commentary on Wang and Zender -MODIS snow albedo bias at high solar zenith angles relative to theory and to in situ observations in Greenland,» pp. 115,1293-1300, 2011.
- [17] Mary A., Dumont M., Dedieu J.P., Durand Y., Sirguey P., Milhem H., Morin «Intercomparison of retrieval algorithms for the specific surface area of snow from near-infrared satellite data in mountainous terrain, and comparison with the output of a semi-distributed snowpack model,» pp. 7, 741-761., 2013.
- [18] Fréville H., Brun , Picard G., Tatarinova N., Arnaud L., Lanconelli C., Reijmer C. «Using MODIS land surface temperatures and the Crocus snow model to understand the warm bias of ERA-Interim reanalyses at the surface in Antarctica,» pp. 8, 1361-1373,, 2014.



