

Soutenance de Doctorat Es-Sciences en Physique

Présentée par

Mr Kada BOUCHOUICHA

Thème :

MODÉLISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE

Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère

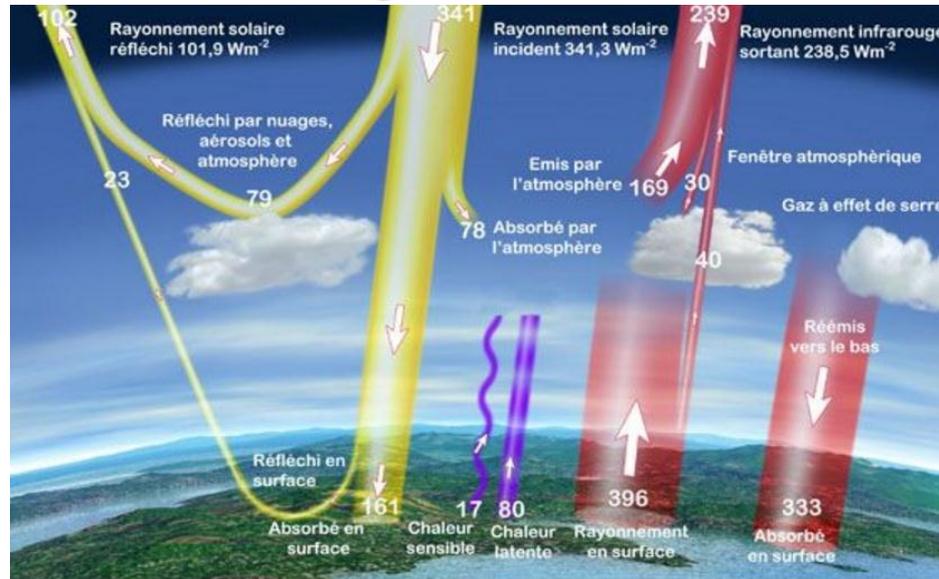
Sous la Direction de :

Professeur BACHARI Nour El-Islam



Contexte général du sujet de thèse

Bilan énergétique de la terre



rayonnement net $R_n = R_s(1 - \alpha) + (R_T \downarrow - R_T \uparrow)$

le bilan radiatif solaire

le bilan des rayonnements thermiques

R_s : Rayonnement solaire global incident sur la surface
 α : Réflectance ou Albédo de surface

Problématique : Quels sont les outils et les techniques qui ont été développés pour évaluer le rayonnement global au sol et l'albédo de surface ?

Objectif : Etude de la variabilité spatio-temporelle des principales composantes du bilan radiatif solaire au niveau de la surface terrestre,

Plan

1) ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire
- Rayonnement global horizontal par ciel clair
- Rayonnement global horizontal par ciel quelconque

2) EXPLOITATION DES OBSERVATIONS FAITE PAR LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES

- Estimation et cartographie de l'Albédo de surface
- Estimation du Rayonnement global horizontal

3) CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL.

1) ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire
- Rayonnement global horizontal par ciel clair
- Rayonnement global horizontal par ciel quelconque

2) EXPLOITATION DES OBSERVATIONS FAITE PAR LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES

- Estimation et cartographie de l'Albédo de surface
- Estimation du Rayonnement global horizontal

3) CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL.

Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire

PROBLÉMATIQUE

PLAN

● ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT

EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES

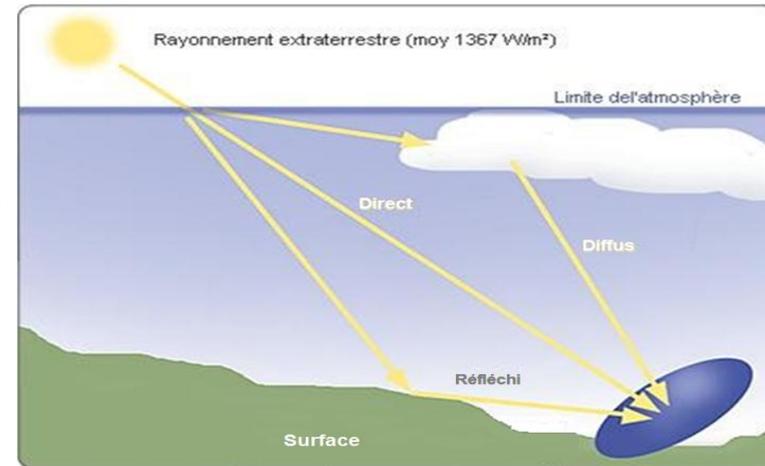
CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT

CONCLUSIONS

Rayonnement global : se décompose en trois composantes: direct, diffus et réfléchi

dépend de :

- La position de la terre sur son orbite
- La latitude du lieu
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maxima à midi solaire)
- L'état optique de l'atmosphère
 - ✓ Concentrations des constituants atmosphériques
 - ✓ Situation atmosphérique (ciel clair ou couvert)
- Orientation et inclinaison de la surface réceptrice



Réflectance & Albédo : Rayonnement réfléchi / Rayonnement incident

- Albédo - Intègre les réflectances sur l'ensemble du spectre solaire (0.3 à 3 μm)
- Tous les angles d'incidences possibles

dépend de :

- La longueur d'onde du rayonnement incident
- L'angle d'incidence
- La nature du sol et l'état de la surface

Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire

PROBLÉMATIQUE

PLAN

- ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT
- EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES
- CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT
- CONCLUSIONS

But : Constituer une base de données expérimentales du rayonnement solaire

Comment ? Mesures & traitement des données radiométriques

Mesures Radiométrique :

- Pyranomètres → Rayonnement global et le diffus,
- Pyréliomètres → Rayonnement direct
- Albédomètre → Albédo de surface (ne sont pas disponible)

Stations automatiques équipées d'un capteur classe 1 ou 2 OMM :

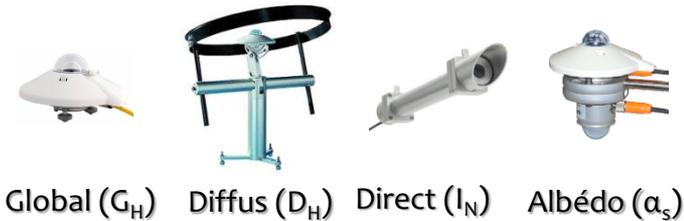
- Classe 1 : précision < 5 %
- Classe 2 : précision de 5 à 7 %.

Domaine spectral : **[0.3 – 3 μm]**

Traitement des mesures :

- Inspection visuelle
- Atténuation de l'erreur du a l'annaux de diffus
- Tests de qualité (recommandés par l'OMM)

Instruments de mesure



Stations de Mesure

CDER- Bouzareah

Adrar



Station URER-MS Adrar



Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire

PROBLÉMATIQUE

PLAN

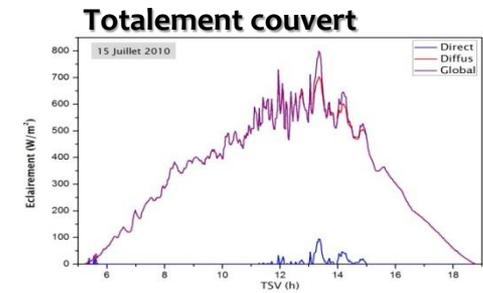
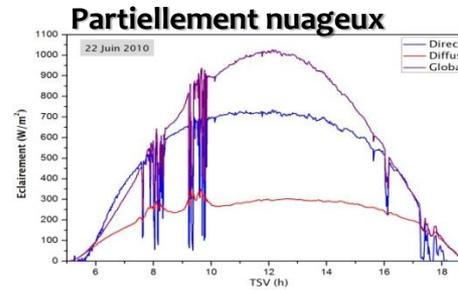
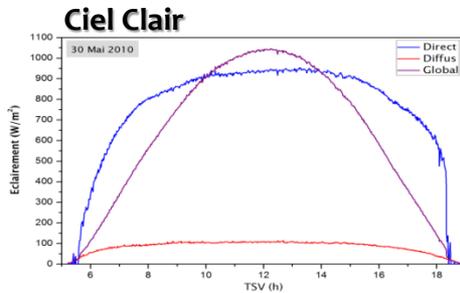
● ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT

EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES

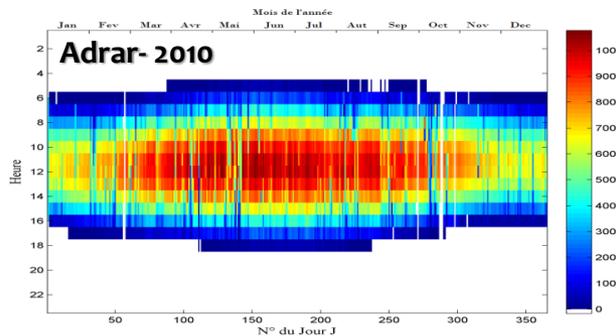
CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT

CONCLUSIONS

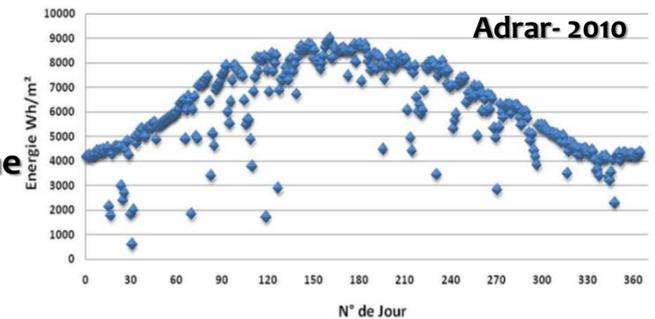
Eclairement
 W/m^2



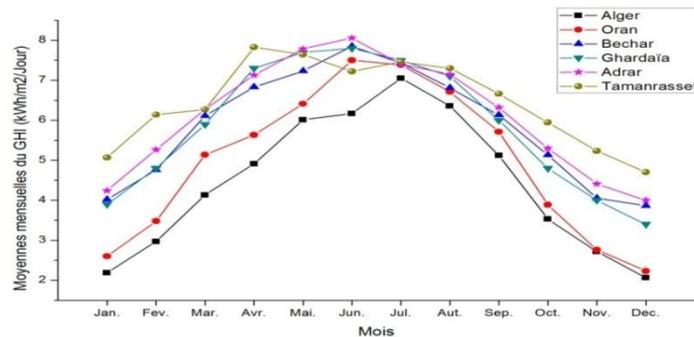
Irradiation Horaire
 Wh/m^2



Quotidienne



Moyennes mensuelles
des irradiances journalière
 $Wh/m^2/Jour$



Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire

PROBLÉMATIQUE

PLAN

● ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT

EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES

CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT

CONCLUSIONS

➤ La meilleure approche d'évaluation du rayonnement solaire au sol est de disposer d'un réseau de mesure radiométrique

➤ Problématique

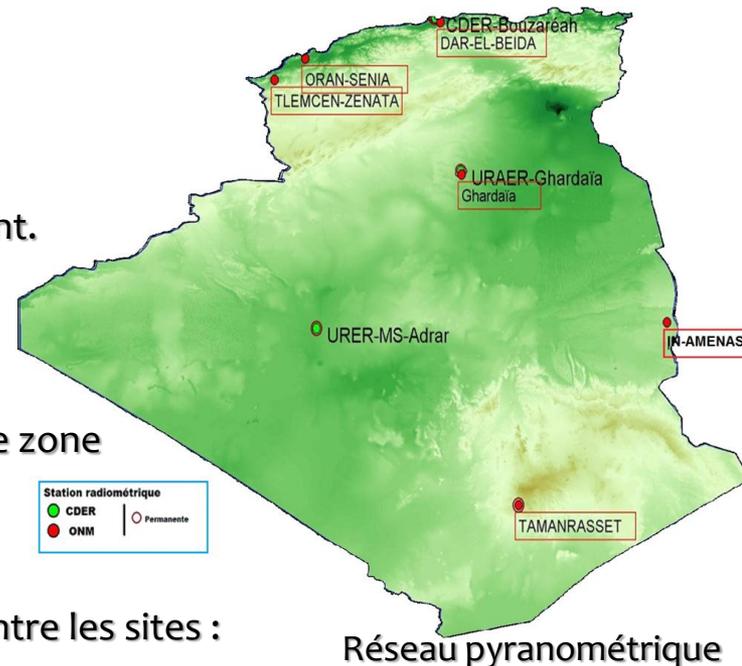
- Les coûts d'investissement et de maintenance sont élevés.
- Les stations ne sont pas toujours équipées de ce type d'instrument.
- Nombre de stations de mesure est insuffisant.

✓ Afin de connaître l'intensité du rayonnement en tout point d'une zone

→ il est nécessaire de procéder à des interpolations

➤ Les résultats de l'interpolation sont en fonction de la distance entre les sites :

- Interpolation : plus la distance est grande → EQM relative est élevée.
- Notre réseau, la distance > 200 km → L'EQM > 40%



L'interpolation ne peut pas répondre pleinement à cette insuffisance.

Approches alternatives :

➤ Méthodes classique basées sur des données météorologiques :

- **Approche 1** : Exploitation des mesures réalisées par des stations météorologiques
- **Approche 2** : Exploitation des sorties des modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT)

➤ Méthodes indirect basées sur le traitement des images satellite

- **Approche 3** : Exploitation des observations réalisées par les satellites météorologiques

1) ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire
- Rayonnement global horizontal par ciel clair
- Rayonnement global horizontal par ciel quelconque

2) EXPLOITATION DES OBSERVATIONS FAITE PAR LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES

- Estimation et cartographie de l'Albédo de surface
- Estimation du Rayonnement global horizontal

3) CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL.

Modélisation théorique du rayonnement solaire à ciel clair

Rayonnement global horizontal par ciel clair

- Une étude comparative entre 4 approches d'estimation du rayonnement par ciel clair.

Deux types de modèle ont été utilisés :

- **Type 1** : l'absorption et la diffusion sont exprimées par le facteur TL
 - Modèle 1 : Perrin de Brichambaut (WMO)
 - Modèle 2 : R.sun
- **Type 2** : l'estimation des différents coefficients d'extinction du rayonnement solaire (vapeur d'eau, ozone et aérosols) est basée sur des relations empiriques.
 - Modèle 3 : Davies & Hay
 - Modèle 4 : Bird & Hulstrom

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel clair

Modèles d'estimations :

Modèle 1 : Perrin de Brichambaut (WMO)

$$G_{skc} = (1250 - 50T_L)(1 + \varepsilon) (\cos \theta_s)^{0.01(3T_L + 10)}$$

$$I_{skc} = (900 - 20T_L)(1 + \varepsilon) \exp\left(\frac{-T_L}{12.6 \cos \theta_s}\right)$$

$$D_{skc} = 248(1 + f)(\cos \theta_s)^{\frac{T_L + 5.7}{30}} \exp\left(-\frac{4}{T_L}\right)$$

Modèle 2 : R.sun

$$I_{skc} = I_o \exp[-0.8662 T_L m_a \delta_R] \sin(h)$$

$$D_{skc} = I_o T_n(T_L) \cdot F_d(h, T_L)$$

Modèle 3 : Davies & Hay

$$I_{skc} = I_o (\tau_o \tau_r - \alpha_w) \tau_a \sinh$$

$$D_{skc} = D_g + D_{as}$$

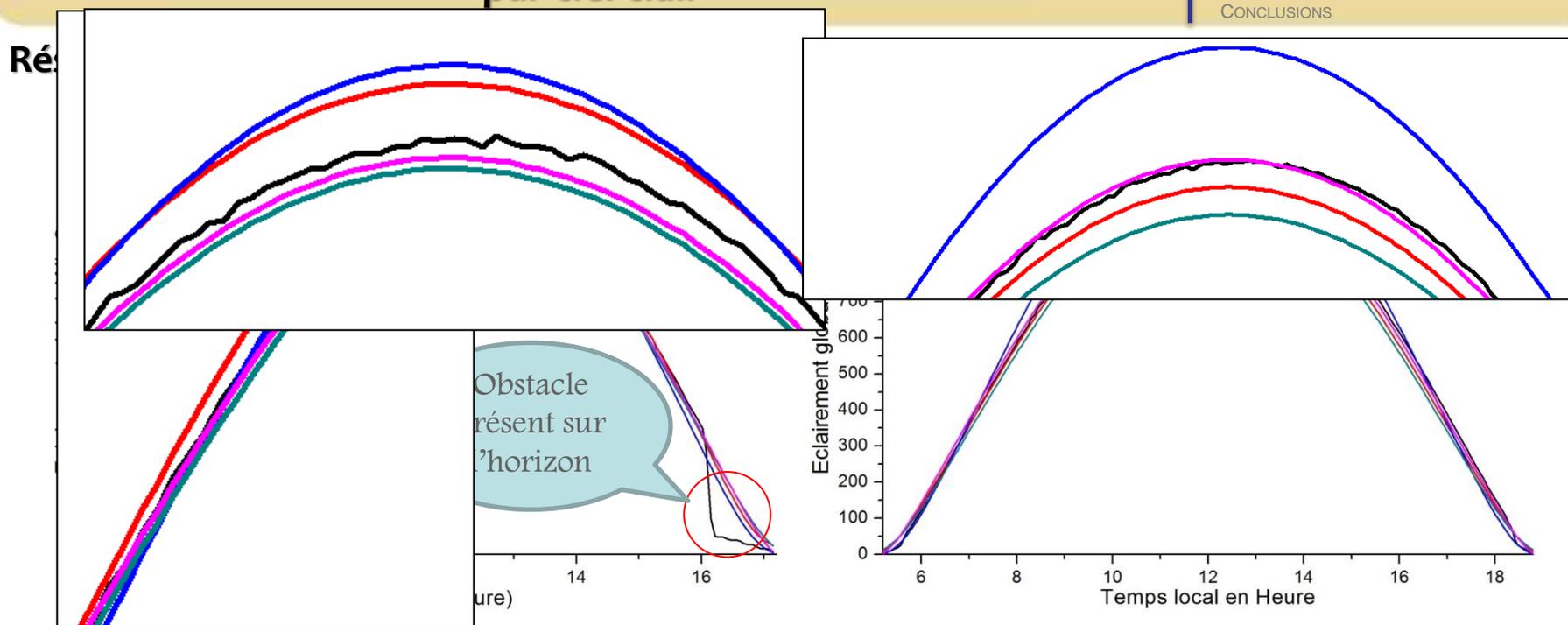
Modèle 4 : Bird & Hulstrom

$$I_{skc} = 0.9751 I_o \tau_r \tau_g \tau_o \tau_w \tau_a \sin(h)$$

$$D_{skc} = D_r + D_a + D_m$$

$$D_r = 0.79 I_o \cos(z) \tau_g \tau_o \tau_w \tau_{aa} \frac{(1 - \tau_r)}{2(1 - m_a + m_a^{1.02})}$$

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel clair



Scores statistiques :

- Erreur Moyenne (MBE)
- Erreur quadratique Moyenne (RMSE)
- Coefficient de corrélation (R)

$$MBE(\%) = 100 \times \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{Est,i} - X_{Mes,i}}{X_{Mes,i}} \right) \right)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{Est,i} - X_{Mes,i}}{X_{Mes,i}} \right)^2}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - \bar{X}_{Sim})(X_{Mes,i} - \bar{X}_{Mes})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Sim,i} - \bar{X}_{Sim})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Mes,i} - \bar{X}_{Mes})^2}}$$

Résultats statistiques simulation du 15 Janvier 2014.

Modèle	MBE(%)	RMSE (%)	R
Modèle 1	4,9810	6,8420	0,9955
Modèle 2	5,6525	6,9526	0,9944
Modèle 3	4,1941	6,6968	0,9951
Modèle 4	3,1482	6,3058	0,9951

Résultats statistiques simulation du 03 Juin 2014.

Modèle	MBE(%)	RMSE(%)	R
Modèle 1	3,3919	4,2110	0,9984
Modèle 2	9,4494	11,7544	0,9987
Modèle 3	6,5167	7,1606	0,9993
Modèle 4	1,7063	1,8990	0,9994

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel quelconque

PROBLÉMATIQUE

PLAN

● ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT

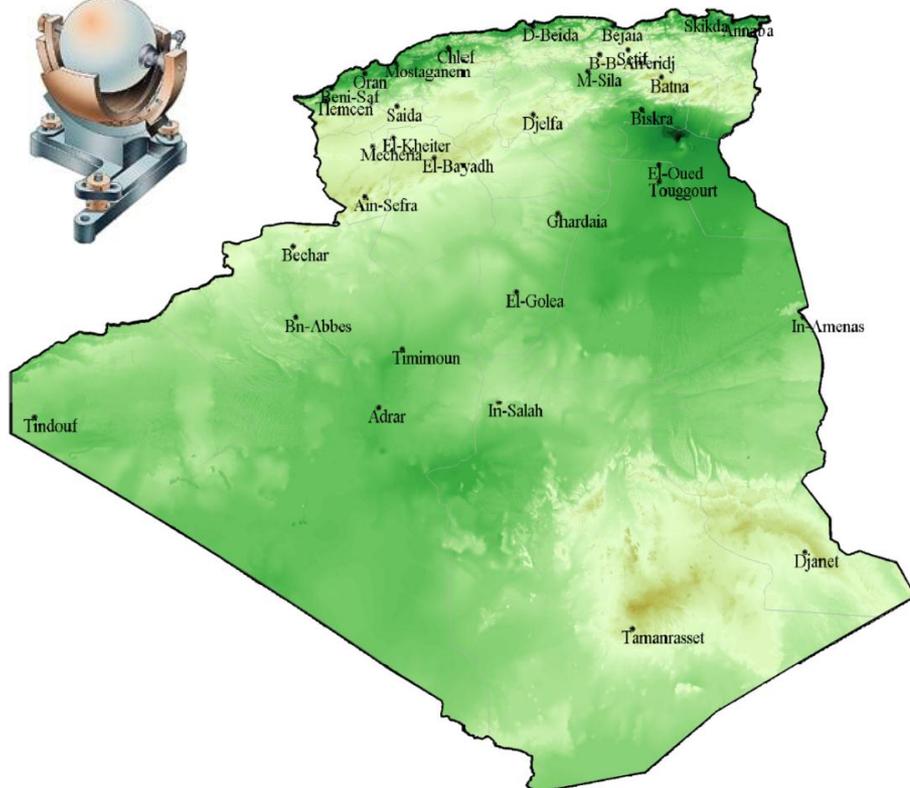
EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES

CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT

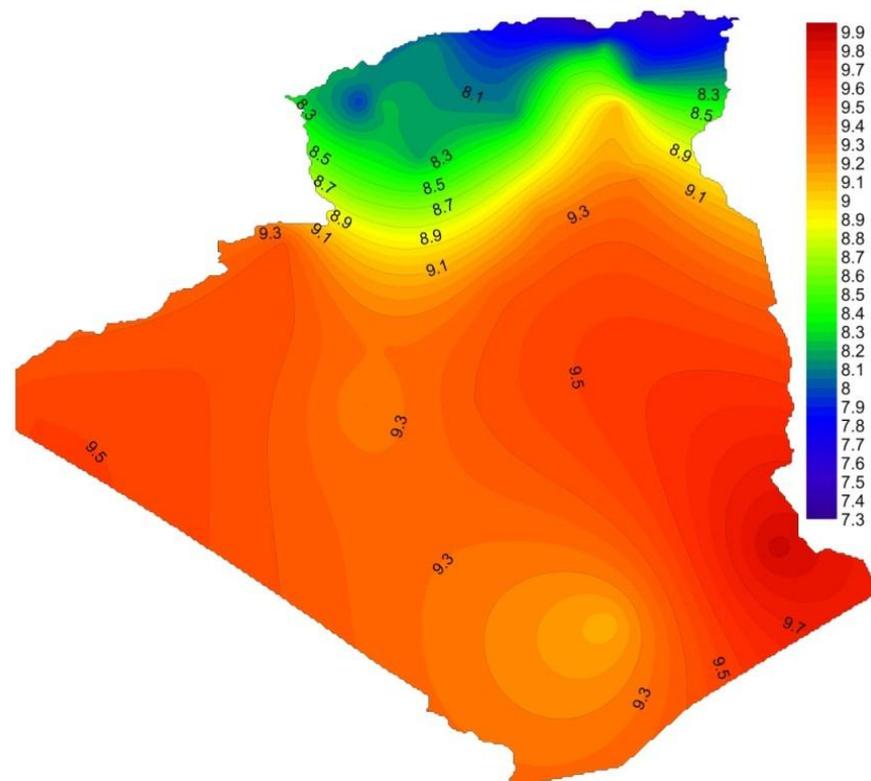
CONCLUSIONS

Approche 1 : Exploitation des mesures réalisées par les stations météorologiques

- La durée d'insolation



Réseau d'Héliographe (ONM).



Durée d'ensoleillement moyen annuel (Heure) (1983-2012).

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel quelconque

Rayonnement global en fonction de la durée d'insolation (Modèle)

$$\frac{H}{H_0} = f \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

H : Moyennes mensuelles (mesure)

H₀ : Rayonnement Hors Atmosphère

S : Durée moyenne d'ensoleillement (h)

S₀ : Durée astronomique du jour (h).

a, b, c et d sont des constantes empiriques dépendant du site.

Modèles	Types	Equations
1	Linaire	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right)$
2	Polynomiale 2	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2$
3	Polynomiale 3	$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 + d \left(\frac{S}{S_0} \right)^3$
4	Logarithmique	$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \log \left(\frac{S}{S_0} \right)$
5	Puissance	$\frac{H}{H_0} = a \cdot \left(\frac{S}{S_0} \right)^b$
6	Exponentiel	$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \exp \left(\frac{S}{S_0} \right)$

Coordonnées géographiques des stations utilisées.

Station	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Période
Adrar	27.88°N	0°17°E	269	1996-2008
Oran	35°38 N	00°36 W	90	2006-2010

Données :

- Mesures des durées d'insolations
- Irradiations quotidiennes GHI

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel quelconque

Rayonnement global en fonction de la durée d'insolation (Résultats)

- ✓ 3^{ème} modèle est le plus performant pour Adrar
 - MBE, RMSE (**0.24%, 3.46%**)
- ✓ Le modèle 4 pour le site d'Oran.
 - MBE, RMSE (**-0.95%, 4.13%**)

Coefficients et scores statistiques site d'Adrar.

Modèle	Coefficients de Régression				Scores statistiques		
	a	b	c	d	MBE	RMSE	R
1	0.5015	0.2208			0,457	4,551	0.9685
2	-0.3205	2.3070	-1.3154		0,586	4,629	0.9681
3	69.5193	263.917	335.851	-141.874	0,243	3,460	0.9803
4	0.7179	0.1753			0,486	4,559	0.9685
5	0.7156	0.2461			0,271	4,536	0.9688
6	0.4574	0.0990			0,543	4,547	0.9686

Coefficients et scores statistiques site d'Oran.

Modèle	Coefficients de Régression				Scores statistiques		
	A	b	c	d	MBE	RMSE	R
1	0.2622	0.5138			-0,983	4,151	0.979
2	0.4721	0.1339	0.4878		-1,374	4,379	0.976
3	1.7186	10.204	15.482	8.0875	-1,019	4,229	0.982
4	0.7432	0.331			-0,952	4,129	0.987
5	0.7534	0.5431			-1,418	4,476	0.970
6	0.3432	0.8388			-1,2264	4,3452	0.978

- Modèles sont performants pour l'estimation de la moyenne mensuelle GHI
- Peuvent être utilisés à d'autres sites d'un climat similaire
- Reste le meilleur moyen en cas d'absence de mesures radiométrique

Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel quelconque

Approche 2 : Exploitation des prévisions données par les modèles PNT

Méthodes :

Basée sur une régression multiple

$$Gh=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Données :

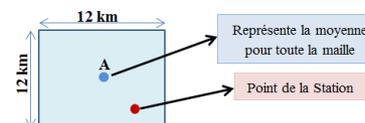
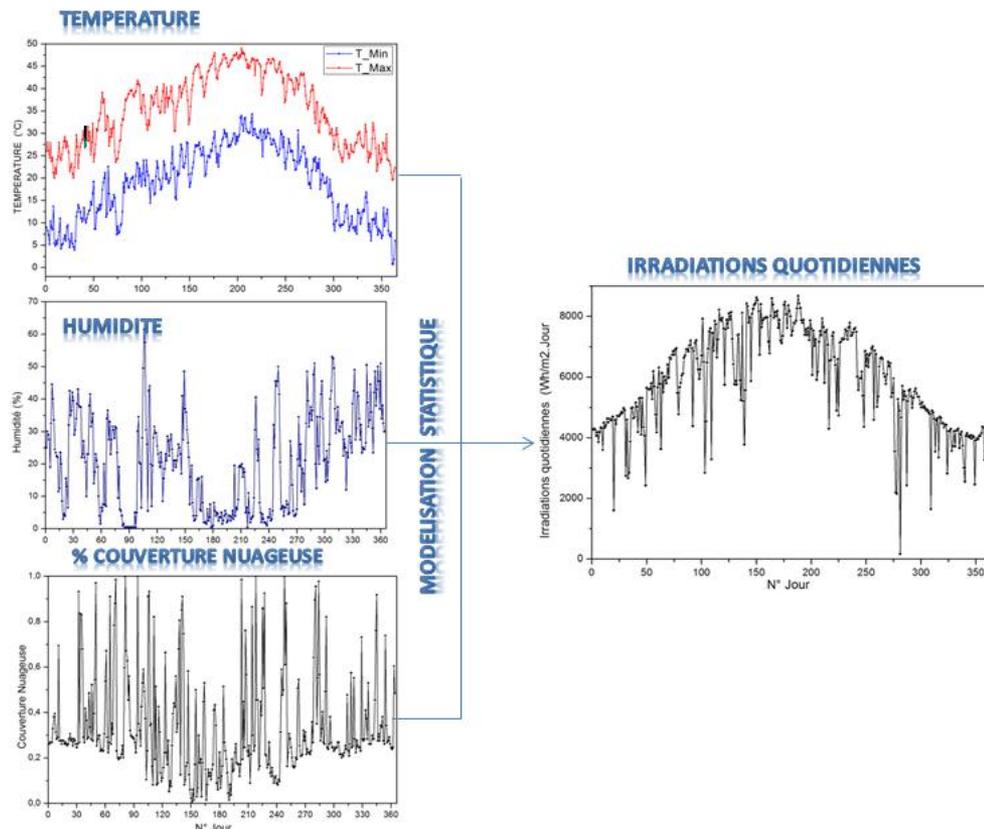
Sortie du Modèle Aladin/Algérie (ONM) :

- Résolution de 12 km
- Les paramètres :

T_{MIN} T_{Max} à 2m, Hum, C_n

➤ Prévisions quotidienne durant l'année 2010

- ✓ 6 mois Apprentissage (Jan-Jun)
- ✓ 6 mois Validation (Jul-Dec)



Modélisation du rayonnement global horizontal par ciel quelconque

Approche 2 : Exploitation des prévisions données par les modèles PNT (Résultats)

Deux meilleurs prédicteurs sont T_{max} et CN

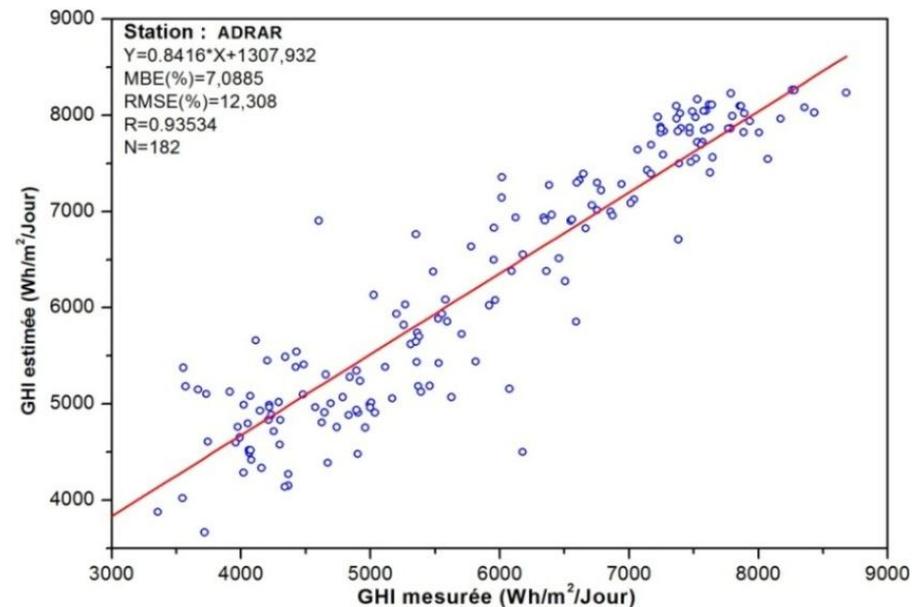
Equation du modèle :

$$GHI = 13,131 * (T_{max}) + 25,924 * (CN) - 1068,304$$

➤ Validation

- RMSE est de l'ordre de 12%.
- MBE positif → Le modèle a tendance a surestimé GHI irradiations quotidiennes.
- Coefficient de corrélation : légèrement faible

Graphique de dispersion GHI



1) ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire
- Rayonnement global horizontal par ciel clair
- Rayonnement global horizontal par ciel quelconque

2) EXPLOITATION DES OBSERVATIONS FAITE PAR LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES (MSG2)

- Estimation et cartographie de l'Albédo de surface
- Estimation du Rayonnement global horizontal

3) CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL.

Approche 3 : Exploitation des observations réalisées par les satellites météorologiques

- ✓ L'estimation des données radiométriques
 - Densité spatiale
 - Régulière & Persistante espace/temps .

Les images MSG2

- ✓ L'instrument principal est le radiomètre SEVIRI
 - Images multi spectrale dans 12 canaux
 - Visible (C1, C2 et C12)
 - Résolution spatiale (Au Nadir) :
 - 3km pour C1 et C2 ,1km pour le HRV.
 - Décroit vers la périphérie de l'image
 - Résolution temporelle : 15 Min

Caractéristiques de prise d'images de MSG3-SEVIR pour les 3 canaux Visible.

Canal	Autre appellation	Caractéristiques Spectrales λ centrale	λ Min	λ Max (nm)
C1	VIS 0.6	0,635	0.56	0.7 1
C2	VIS 0.8	0,81	0,47	0.88
C12	HRV	Large bande environ 0,4-1,1		

SEVIRI produit 25GB de données brutes par jour

Limitations de transmission de l'image HRV →

Le domaine d'étude n'est pas totalement couvert.

Comment déduire une estimation de l'albedo de surface et du rayonnement global à partir d'une mesure radiométrique réalisée au sommet de l'atmosphère ?

Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

Modèle

$$E = E^o + \frac{G_{skc} \cdot T(\theta_v)}{1 - s \alpha_s} \alpha_s$$

➤ Hypothèses simplificatrices

Approximation $(1 - s \alpha_s)^{-1} \approx (1 + s \alpha_s)$

$$E = E^o + G_{skc} \cdot T(\theta_v) \alpha_s + s G_{skc} \cdot T(\theta_v) \alpha_s^2 \quad (IV-4)$$

Solution >0 $\alpha_{s2} = \frac{-G_{skc}T(\theta_v) + [(G_{skc}T(\theta_v))^2 + 4(E - E^o)G_{skc} s T(\theta_v)]^{1/2}}{2 s G_{skc}T(\theta_v)} \quad (IV-10)$

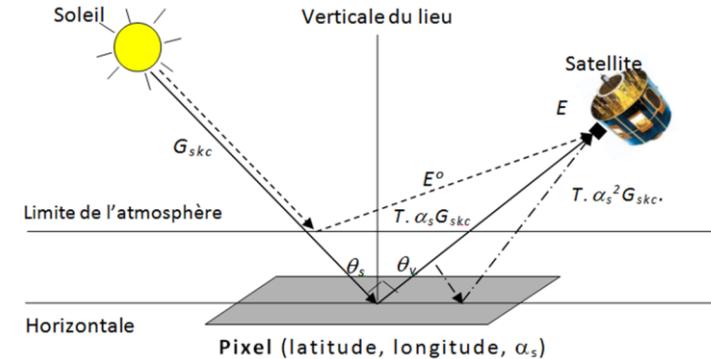
$$G_{skc} = (1265 - 50T_L)(1 + f)(\cos \theta_s)^{0.01(3T_L + 10)} \quad (W \cdot m^{-2})$$

$$T(\theta_v) = \frac{I_{skc}(T_L = 1.5 \text{ Atmosphère de Reigh})}{I_{skc}(T_L)}$$

$$E = offset + slope \cdot compte \quad (mW m^{-2} sr^{-1} (cm^{-1})^{-1})$$

$$E = \frac{10\pi}{(\lambda_o)^2} E \cdot \Delta\lambda \quad (W m^{-2})$$

$E^o \cong 5\%$ de la radiation totale recue par le satellite



✓ Approche de Deneke (2010) : combinaison linéaire des réflectances de C1 et C2

$$\rho_{HRV} = 0,667\rho_{0,6} + 0,368\rho_{0,8}$$

✓ Considérant que la mesure de la réflectance est une mesure de l'albédo de la surface.

Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

PROBLÉMATIQUE

PLAN

ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT
EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES
CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT
CONCLUSIONS

Démarches

1) Technique de la brillance minimale :

- Appliquée sur 30 images prises à une même heure

2) Calcul des radiances

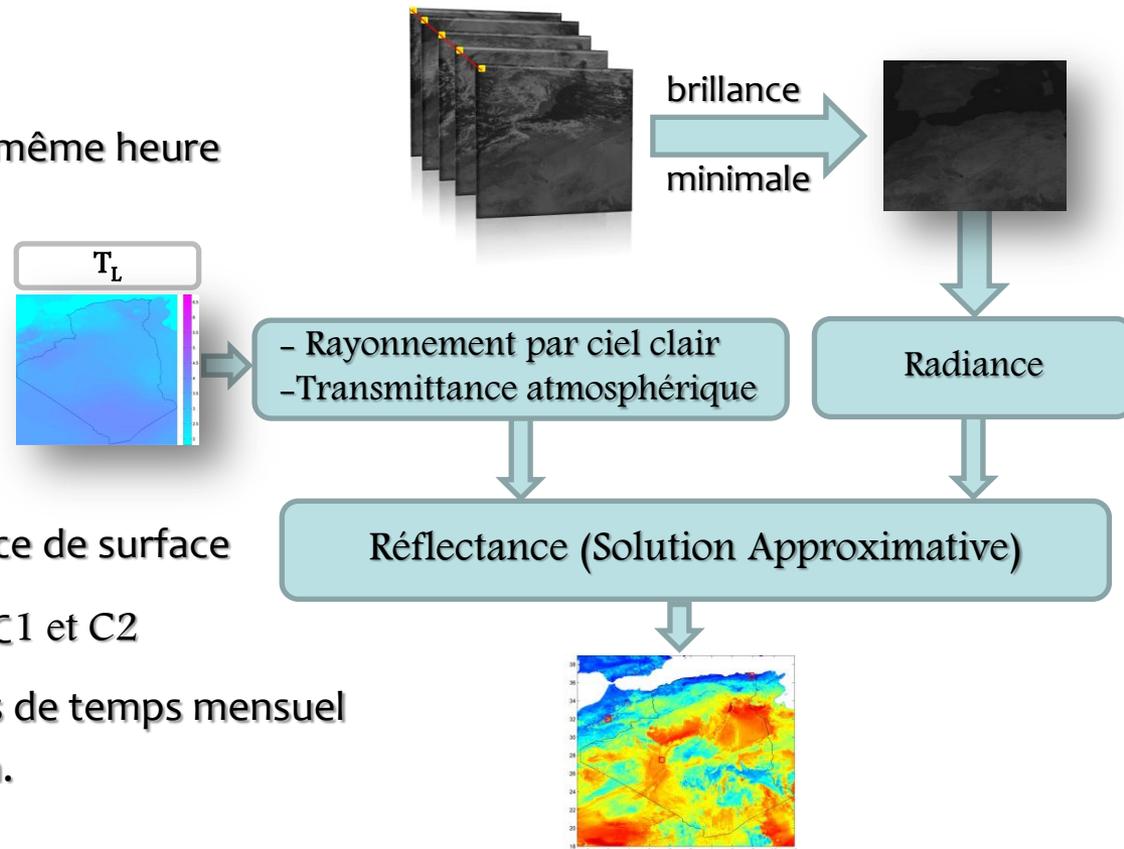
3) Préparation des données T_L

- Rayonnement par ciel clair
- Transmittance atmosphérique

4) L'extraction des valeurs de réflectance de surface

✓ La combinaison des Réflectances de C1 et C2

- Albédo de surface avec un pas de temps mensuel
- Une résolution d'environ 4 km.



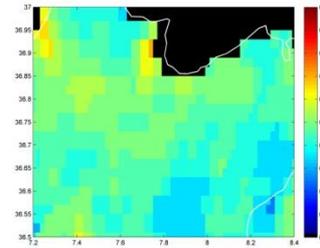
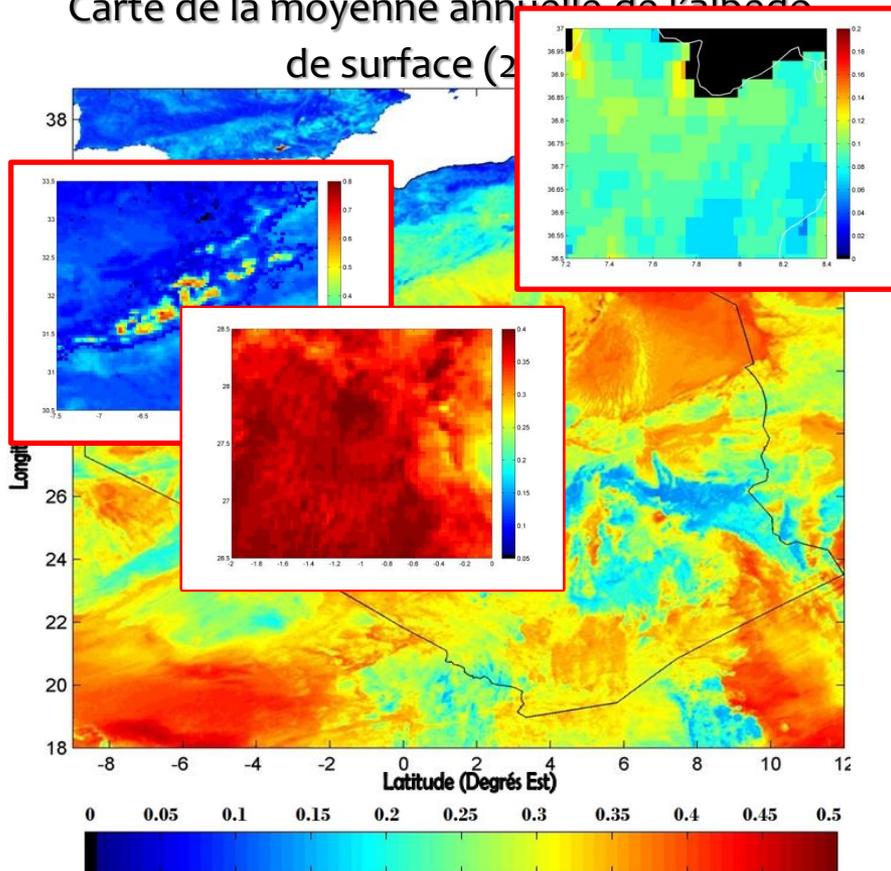
L'albédo varie en fonction de :

- Type des surfaces étendues
- Etat de surface
 - Couverture neigeuse
 - Couvert végétal

Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

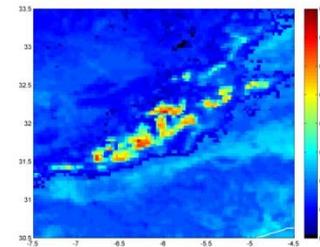
Résultats & Discussions

Carte de la moyenne annuelle de l'albédo de surface (2000-2010)



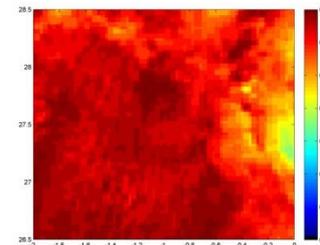
Zone forestière

- au alentour de la forêt d'El-Kala



Zone montagneuse

- La chaîne du Haut Atlas marocain



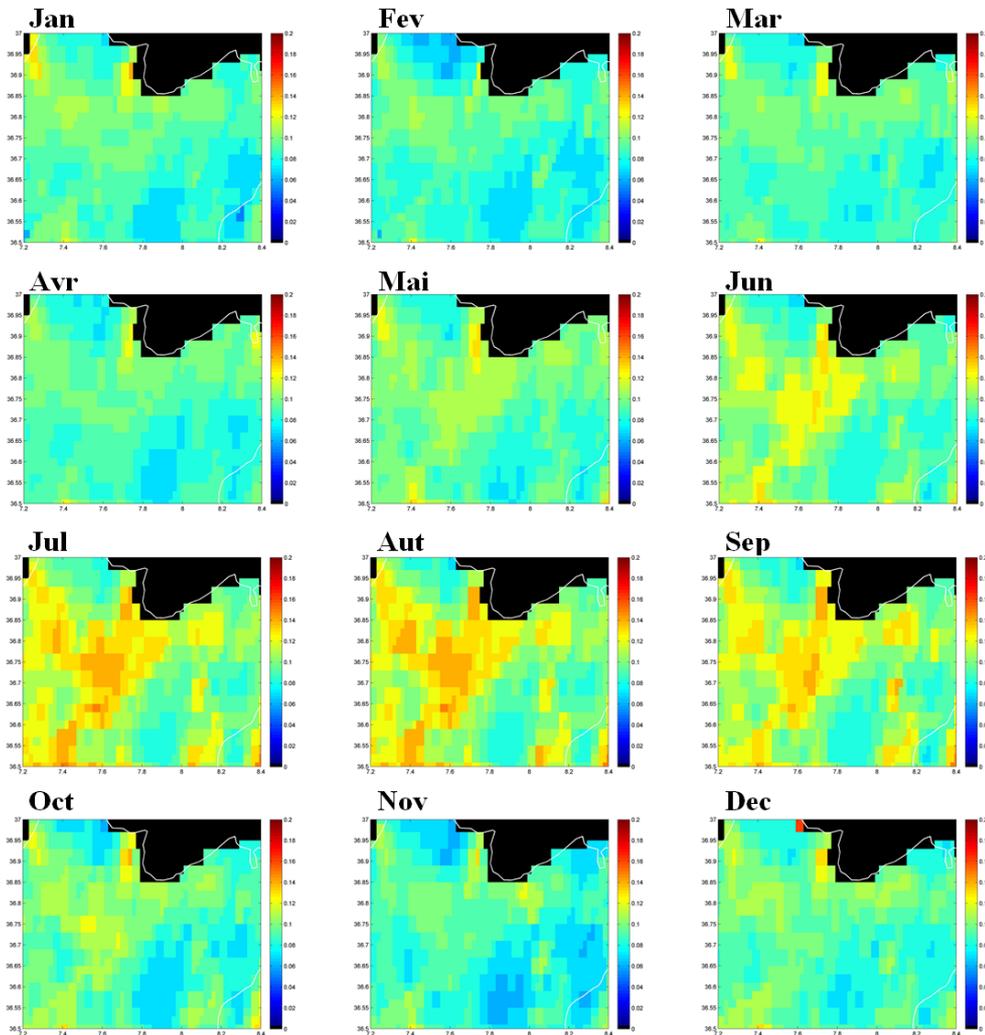
zone désertique

- à la limite de la ville d'Adrar

Les Surfaces enneigées (Haut Atlas Algérien) sont inférieure à la taille du pixel de l'image (4 x 4 km) → Rend difficile à les repérer.

Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

Résultats & Discussions



ZONE 1

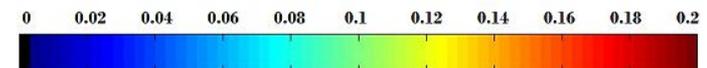
La végétation absorbe fortement le rayonnement solaire

Durant l'hiver :

Développement de La végétation → diminution des valeurs d'albédo

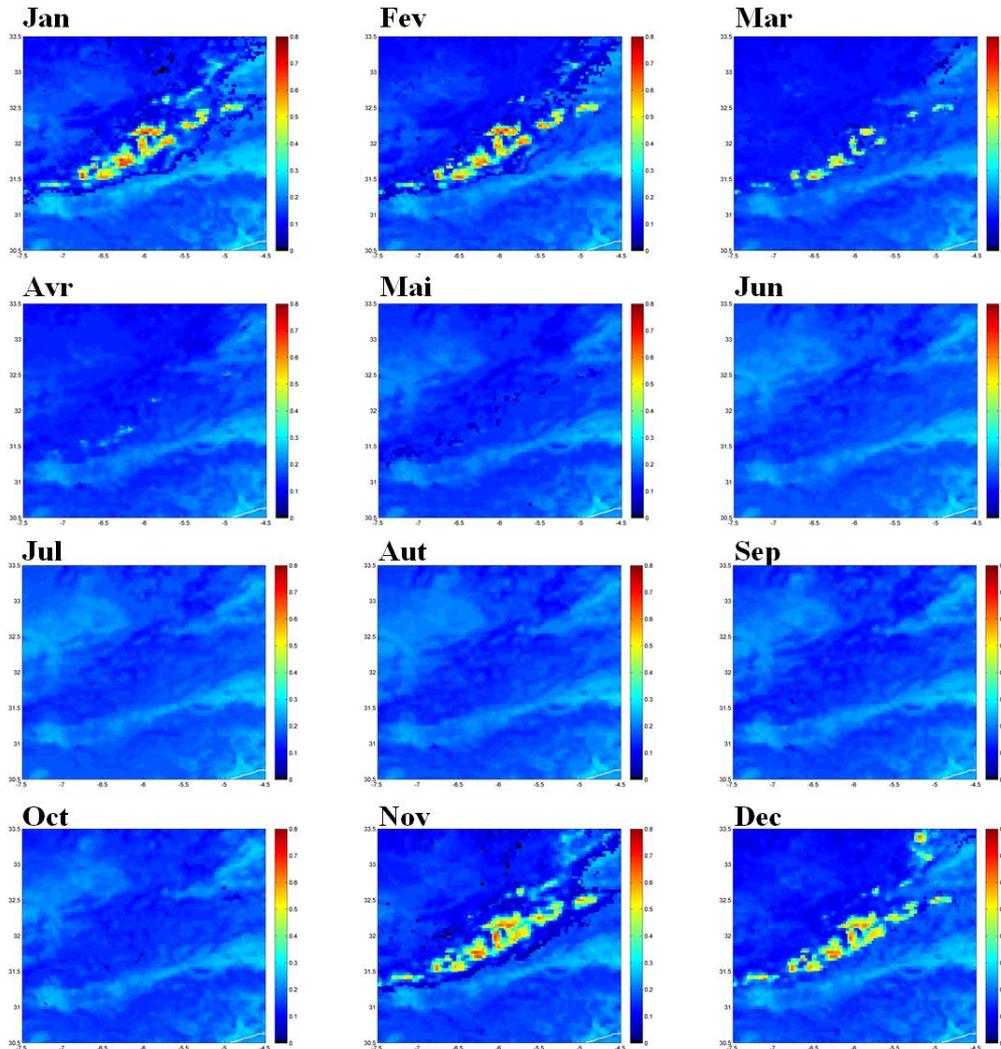
Durant l'été :

Diminution de la surface occupée par la végétation → Augmente des valeurs d'albédo.



Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

Résultats & Discussions



ZONE 2

Albédo élevé correspond à un sol enneigé

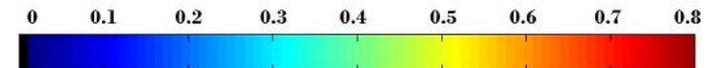
Durant l'hiver :

présence de neige dans toutes les hauteurs → augmentation des valeurs d'albédo

- Varie d'un pixel à un autre
 - Taux de recouvrement
 - Niveau de fraîcheur

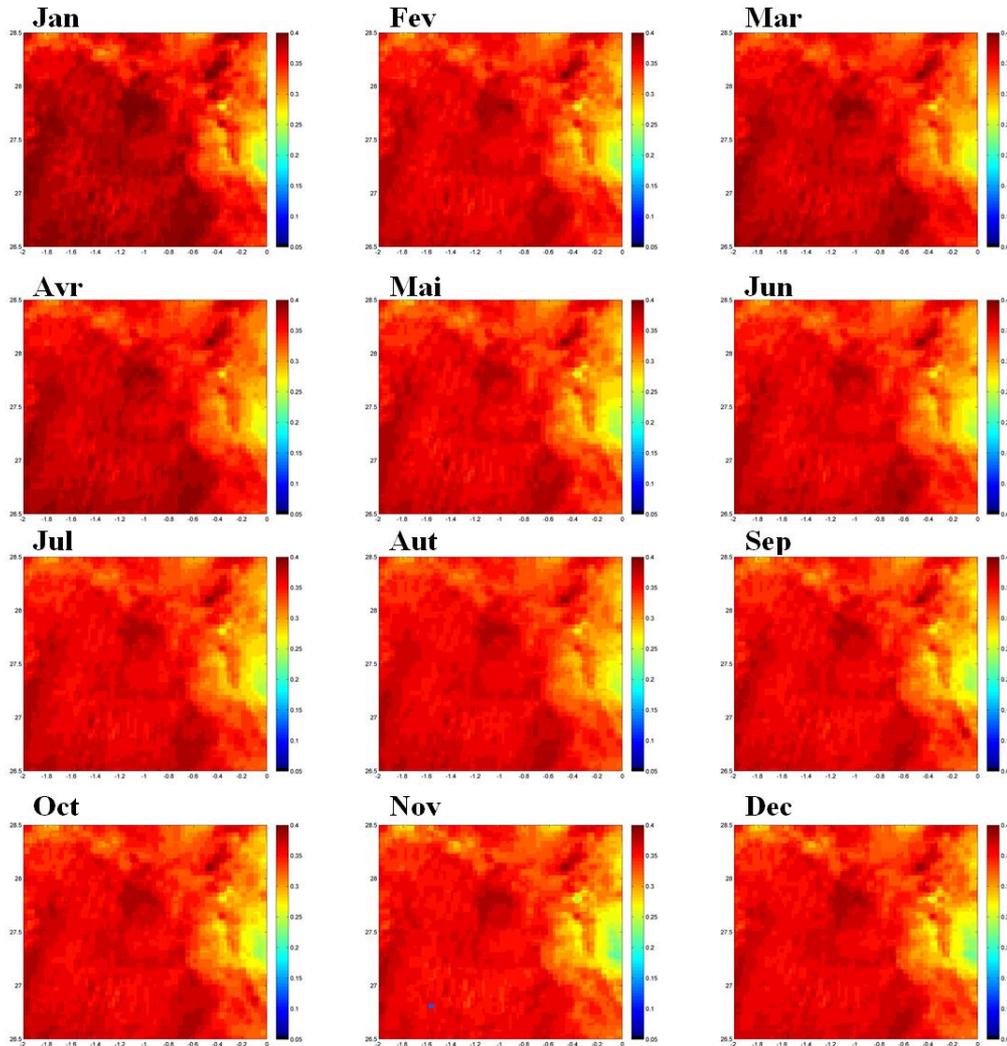
Durant l'été :

disparition de la couverture neigeuse → diminution des valeurs d'albédo.



Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

Résultats & Discussions



ZONE 3

Albédo stable durant l'année

L'Erg

- Les dunes de sable fin recouvrent une grande partie de la surface
- Fort Albédo (**0,3 à 0,4**)

Hamada

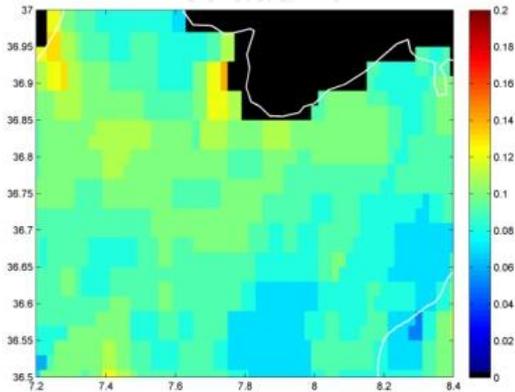
- Constitué des cailloux de différentes tailles
- Albédo moins faible que celui de l'erg



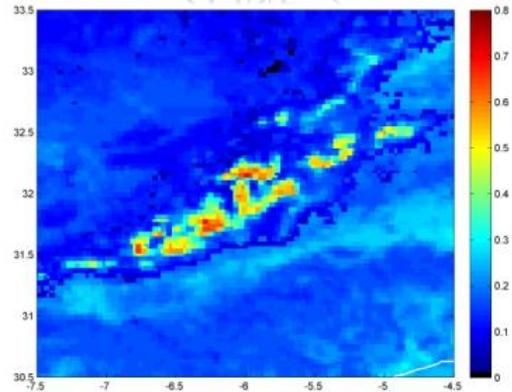
Estimation de l'Albédo de surface à partir des images MSG2

Résultats & Discussions

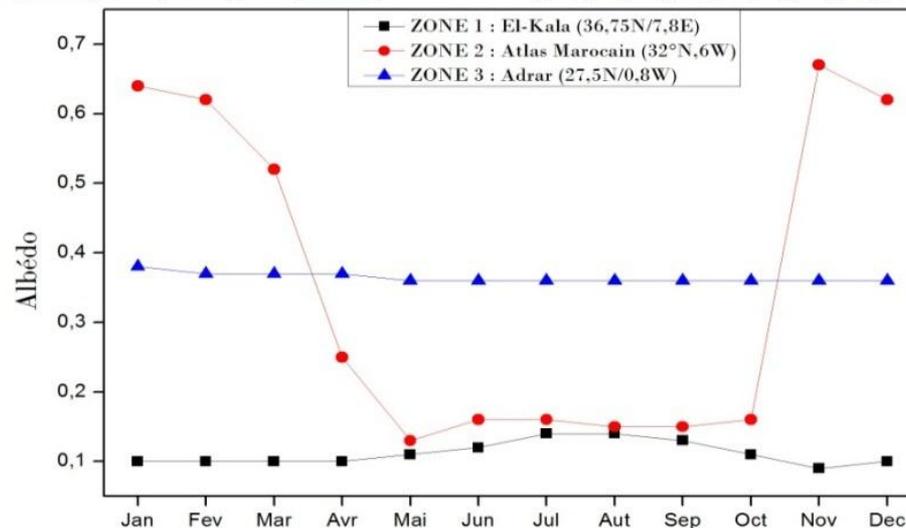
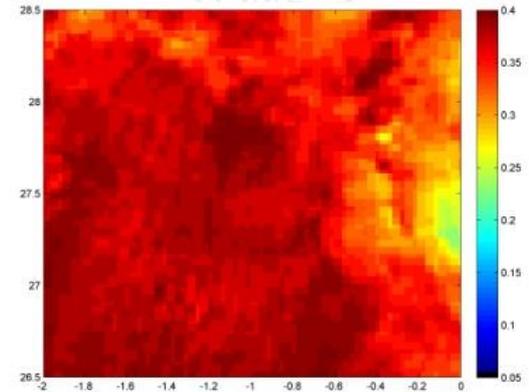
ZONE 1



ZONE 2



ZONE 3



Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Méthodes

⇒ Méthodes indirectes d'estimation

Traitement se décompose en 3 phases :

- i. Détermination préalable d'une quantité qui donne la réponse du sol (albédo, luminance, ...)
- ii. Idem à (i) mais pour un ciel complètement couvert,
- iii. Transformation des mesures satellitaire en données relatives à l'ensoleillement au sol.

⇒ Application

- Phase (i) : Image ciel clair → Albédo de surface
- Phase (ii) : Image ciel totalement couvert → Albédo de nuage
- Phase (iii) : Extraction de l'indice d'ennuagement

1^{ère} Approche

$$G_c = I_{skc} [K (1 - n_c)] + D_{skc} [1.028 + 0.0195 \cdot n_c + 0.0095 \cdot n_c^2 - K (1 - n_c)]$$

2^{ème} Approche

$$G_n = G_{skc} e^{-2.5 \alpha_n n_c}$$

Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Données :

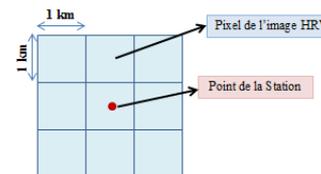
- Mesure au sol
 - Rayonnement global horizontal
 - Cinq Stations
 - Période : l'Année 2010
- Turbidité atmosphérique
 - Moyennes mensuelles de Trouble de Linke
 - La base de données du projet SoDa
- Données satellitaires
 - Données HRV - MSG2
 - Maille de 3x3 km centré sur la station

coordonnées géographiques des stations.

N°	Station	Latitude	Longitude	Élévation (m)
1	DAR-EL-BEIDA	36.68	3.22	25
2	ORAN-SENIA	35.63	-0.6	90
3	ADRAR	27.88	-0.28	269
4	GHARDAIA	32.4	3.8	468
5	IN-AMENAS	28.05	9.63	561

moyennes mensuelles du facteur de trouble de Linke

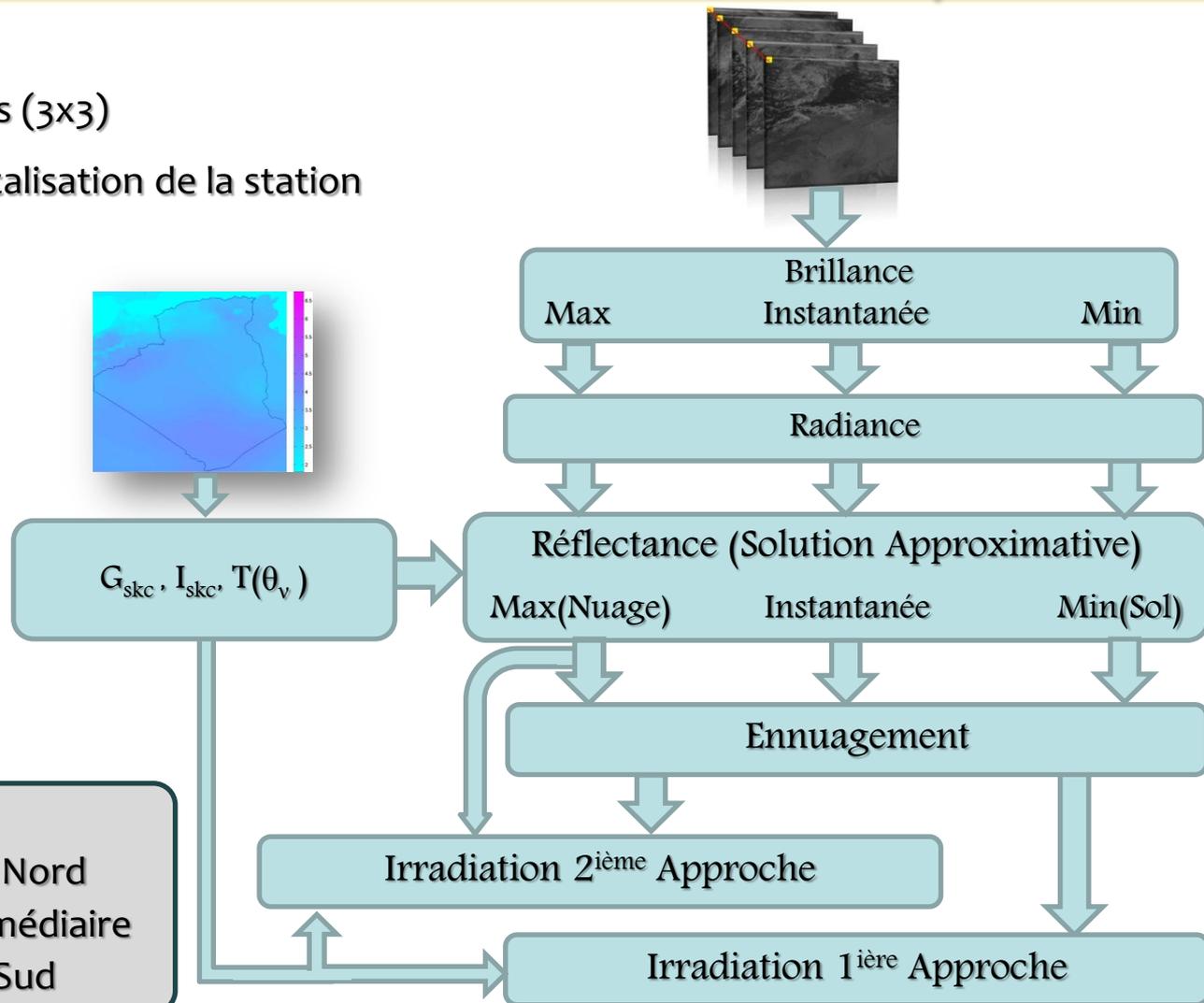
Month	Station				
	1	2	3	4	5
Jan	3.45	2.5	3.2	3.05	3.0
Feb	3.5	2.8	3.35	3.45	3.0
Mar	3.25	2.8	3.6	3.2	3.25
Apr	4.0	3.3	3.75	3.85	3.35
May	3.95	3.45	4.05	3.95	3.65
Jun	4.05	3.9	3.95	4.2	3.55
Jul	4.25	4.1	4.1	4.45	3.65
Aug	4.0	4.1	4.1	4.5	3.65
Sep	4.15	3.8	4.0	4.15	3.6
Oct	3.3	2.9	3.75	3.85	3.45
Nov	3.4	2.6	3.6	3.35	3.05
Dec	3.0	2.25	3.5	3.25	3.0



Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Démarches

- Carré de 9 Pixels (3x3)
- Centré sur la localisation de la station

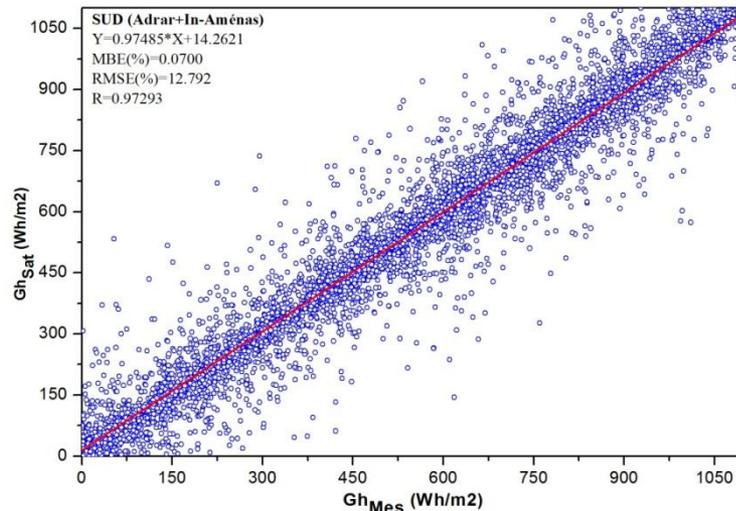
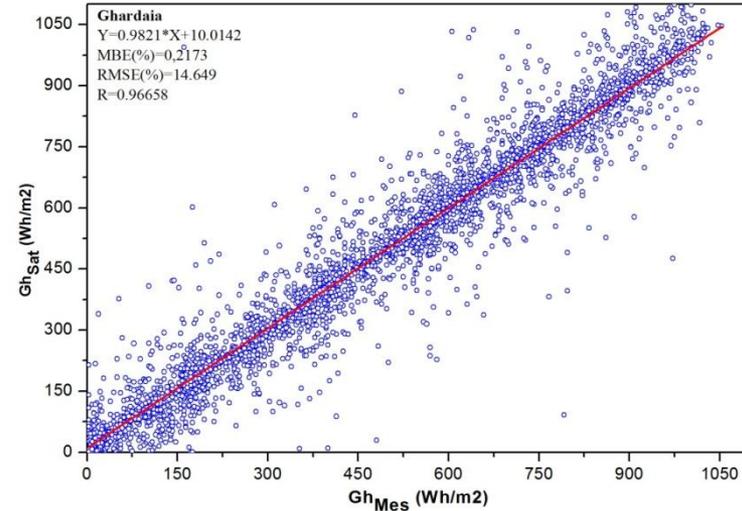
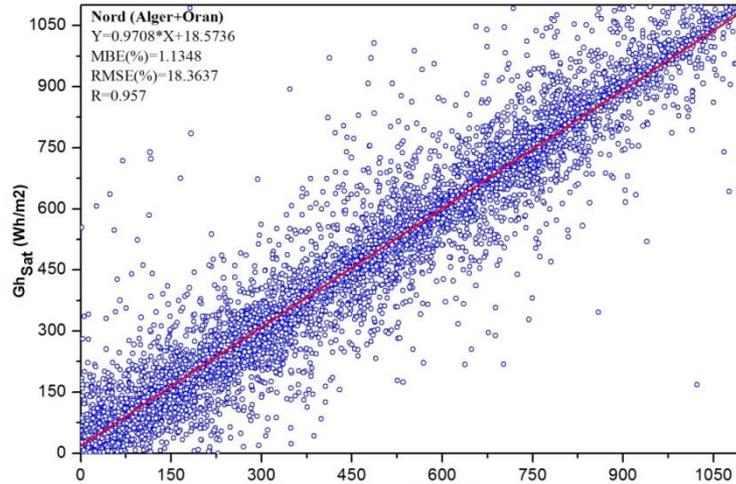


- Régions
 - Sites 1 et 2 → Nord
 - Site 4 → Intermédiaire
 - Sites 3 et 5 → Sud

Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Résultats & Discussions

1^{ière} Approche

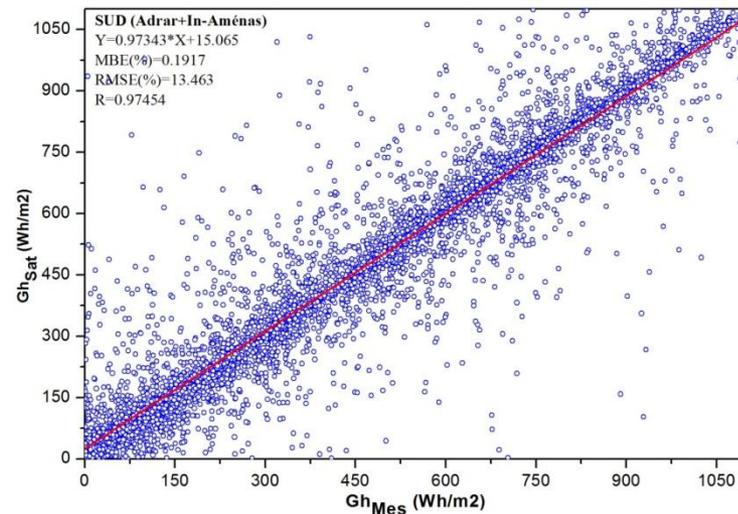
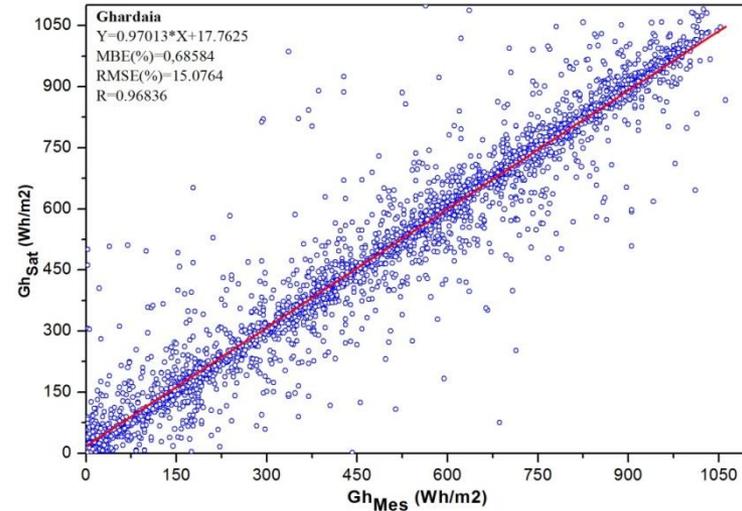
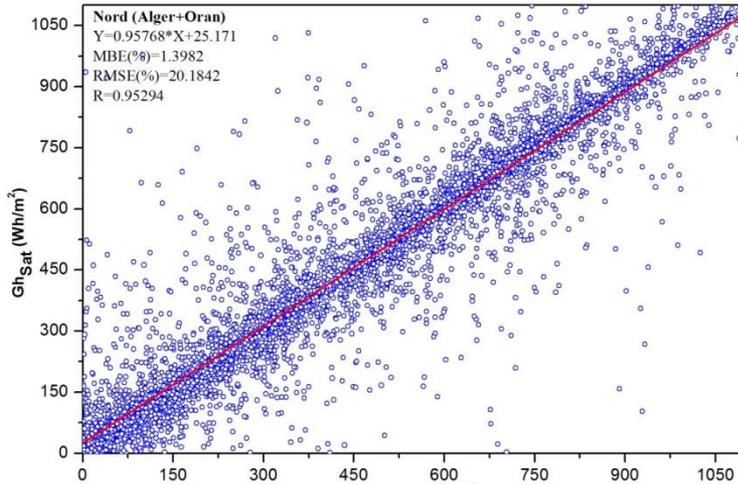


- Dispersion des nuages de points sont assez fortes autour des droites de régression
- Coefficient de corrélation dépassant 95%.
- MBE varie de 0,07 à 1,13%, Avec un Min enregistré au Sud
- RMSE entre 11 à 15% au Sud, >17% au Nord

Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Résultats & Discussions

2^{ème} Approche



- Dispersion moins importante des points par rapport à la 1^{ère} Approche
- MBE varie de 0,2 et 1,3%.
- RMSE entre 12 et 15% au Sud, >19% au Nord

Estimation du rayonnement global horizontal à partir des images MSG2

Résultats & Discussions

- Les résultats des GHI quotidiennes confirment que
 - ✓ 1^{ière} approche se révèle précise par rapport à la 2^{ième}

❑ Comparaison avec les méthodes existantes

- Les deux méthodes montrent une performance équivalente à celles des méthodes existantes
- Irradiation Horaire :
 - RMSE 11% - 21% ; $0,94 < R < 0,98$
- Irradiation Journalière :
 - RMSE 4% - 12% ; $0,96 < R < 0,99$

Scores statistiques annuels (les irradiations quotidiennes).

Station	Modèle	RMSE(%)	R
1	(1)	7,88	0,984
	(2)	11.89	0.989
2	(1)	7,6	0,987
	(2)	10.28	0.993
3	(1)	4,95	0,989
	(2)	4.70	0.989
4	(1)	4,26	0,991
	(2)	4.98	0.994
5	(1)	4,57	0,986
	(2)	4.64	0.987
Tous	(1)	5,7	0,989
	(2)	7.67	0.966

Tableau récapitulatif des résultats des différentes méthodes utilise les images METEOSAT.

Méthode	Res.Temp.	RMSE(%)	R	Référence
Heliosat 1	HR	14%-30%	-	<u>Rigollier et al. (2004)</u> (Europe 1983-2003)
	JR	9%-16%	-	
Heliosat 2	HR	18%-45%	0.83-0.90	<u>Rigollier et al. (2004)</u> (Europe 1995)
	JR	10%-20%	0.94-0.95	<u>Moradi et al. , (2009)</u> (Iran 2004)
Heliosat 3	HR	17%-46%	0.86-0.98	<u>Beyer et al. (2009)</u> (Europe 1995)
			0.90-0.98	<u>P. Ineichen, May 2009</u> (Europe 2006)
Solemi (MESoR)	HR	-	0.91-0.98	<u>Beyer et al. (2009)</u> (Europe 1996-2000)
	JR	-	0.98-0.99	
GISTEL	HR	7%-23%	0,88-0,97	<u>Mefti et al. (2008)</u>
SICIC	JR	9%-30%	0,81-0,94	<u>Algeria (1994-1995)</u>
GISTEL	JR	-	0,96	<u>Chaabane et al. (2002)</u> (Tunisia, 1995)
GISTEL	HR	-	0,77	<u>Meziani et al. (2013)</u>
	JR	-	0,96	<u>(Algeria, 2011)</u>

HR : Horaire ; JR : Journalière.

1) ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

- Exploitation et traitement de mesures au sol du rayonnement solaire
- Rayonnement global horizontal par ciel clair
- Rayonnement global horizontal par ciel quelconque

1) EXPLOITATION DES OBSERVATIONS FAITE PAR LES SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES (MSG2)

- Estimation et cartographie de l'Albédo de surface
- Estimation du Rayonnement global horizontal

3) CARTOGRAPHIE DE LA CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL.

Climatologie du rayonnement global

- La réalisation d'une climatologie du rayonnement global
 - Possession d'une série de données complètes et homogènes
 - Pour période suffisamment longue, > dix années.
- Les bases qui répondent à ces critères :
 - Des bases de données commerciales (Solar-Med-Atlas, SolarGIS)
 - Des bases de données libres d'accès :
 - ✓ Données de quelques sites (SoDa, BSRN)
 - ✓ Couverture globale (NASA-SSE)

But : Réalisation d'un système d'information en climatologie solaire adapté au besoin des utilisateurs, sous forme de cartes et fichiers spatialisés.

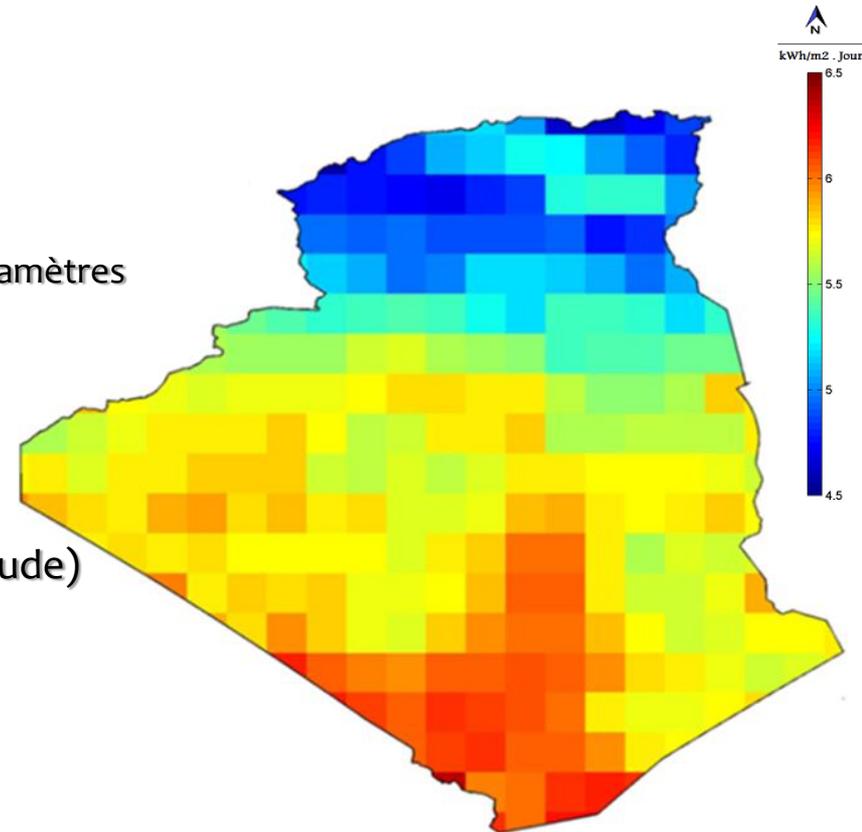
SolarGIS : Solar Geographical Information System
BSRN : Baseline Surface Radiation Network
NASA : National Agency Service of America
SSE :Surface meteorology and Solar Energy

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

Données :

⇒ NASA-SSE

- Programmes SSE développés par la NASA
- Sources de données
 - Observations satellitaires + Mesures au sol de plusieurs paramètres
- Irradiations moyennes mensuelles (Wh/m².Jour)
- Période de 22 ans (1983-2005).
- Une grille géographique régulière (Latitudes, Longitude)
- Une résolution de 1° Lat/Lon (Environ 100x100 km²)
- Évaluation par rapport au BSRN → RMSE de 10,25 %



SSE : Surface meteorology and Solar Energy
BSRN : Baseline Surface Radiation Network

Méthodologie

Méthode développée par Wahab et al. (2008)

$$G_h(z) = G_0 e^{(-\tau(z))} \quad \tau(z_0) = -\ln\left(\frac{G_h(z_0)}{G_0}\right)$$

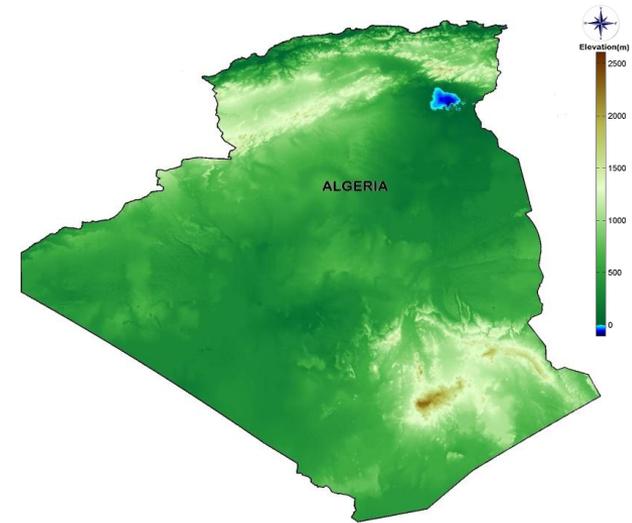
$$\tau(z) = \tau(z_0) \beta^{(z_0-z)} \quad \beta = 1.20$$

$z_0 \rightarrow 1^\circ \text{ Lat/Lon}$ (NASA-SSE)

$z \rightarrow 0.00833^\circ \text{ Lat/Lon}$ (MNT)

⇒ Données MNT

- Développés par U.S.G.S
- Dérivées des données de la GTOPO30
- Une résolution de 30 secondes d'arc (0.00833° environ 1 km)
- Une grille régulière (Latitudes, Longitude)
- Élévation (mètre)

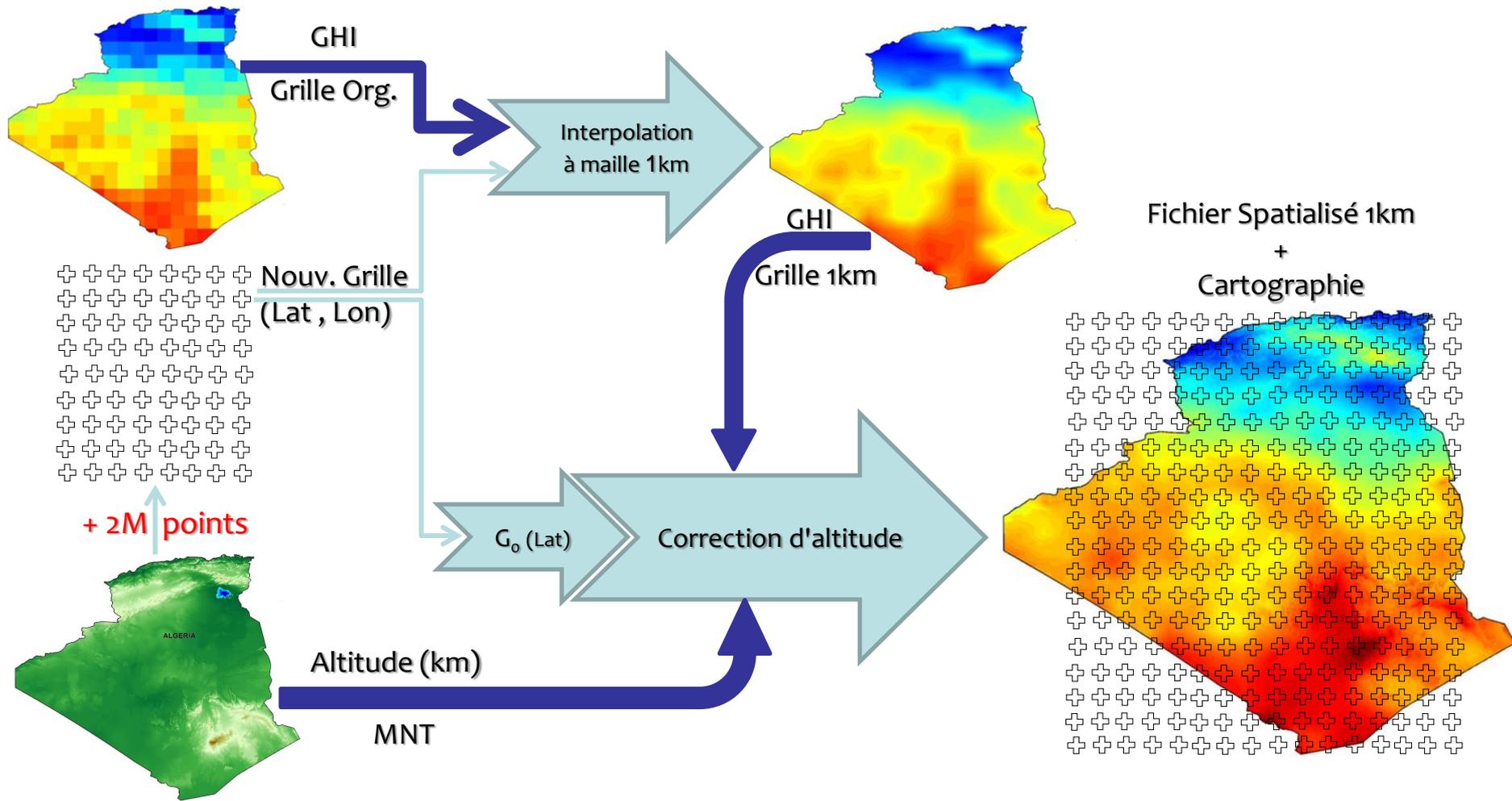


GTOPO30 : Global TOPOgraphic data sets 30 arc-seconds

USGS : U.S. Geological Survey's

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

Méthodologie



● Post-traitement des données, calculs & Cartographie spatiale programmées sous MATLAB®

Résultats & Discussions

⇒ Mesure au sol

- Les moyennes mensuelles des irradiations journalières

➤ Comparaison des moyennes mensuelles GHI :

- GHI NASA-SSE Original
- GHI désagrégé à partir de NASA-SSE

➤ résultats de la méthode de désagrégation :

- MBE variant de 4 à 15,5 %.
- RMSE varie entre 7,5 % et 16,5 %.
- Pas de différences significatives en terme de coefficient de corrélation.

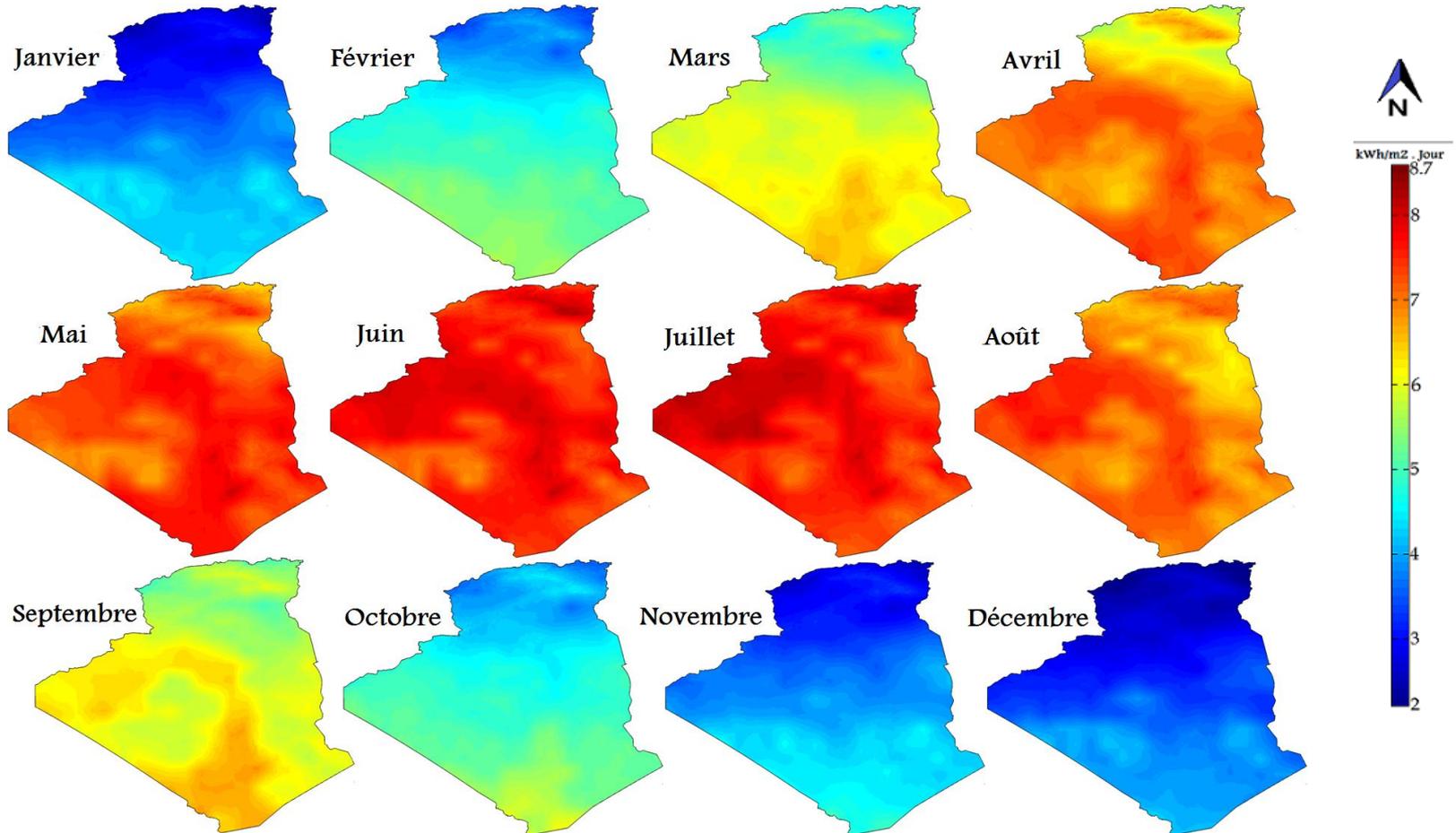
N°	Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Élévation (m)
1	Alger	36.68	3.22	25
2	Oran	35.63	-0.6	99
3	Bechar	31.38	-2.15	806
4	Ghardaïa	32.4	3.81	450
5	Adrar	27.88	-0.28	269
6	Tamanrasset	22.78	5.52	1378

résultats statistiques (a) NASA-SSE original.
 (b) NASA-SSE corrigés

Station	Modèle	MBE	RMSE	R
1	(a)	16.94	18.56	0.982
	(b)	15.57	16.57	0.989
2	(a)	-8.33	9.07	0.994
	(b)	-5.07	6.25	0.993
3	(a)	-7.53	13.82	0.988
	(b)	-5.46	12.77	0.989
4	(a)	-8.54	11.46	0.995
	(b)	-4.3	9.15	0.994
5	(a)	-12.07	12.66	0.984
	(b)	-10.68	12.29	0.987
6	(a)	-8.11	8.74	0.969
	(b)	-6.7	7.59	0.966

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

Résultats & Discussions



Résultats & Discussions

➤ Octobre à Mars

- Le potentiel solaire est le plus faible
- GHI moyenne entre 3,3 et 5,9 kWh/m² jour
- plus variable, avec un écart-type supérieur à 0,5.

➤ Avril à Septembre

- Le potentiel solaire est élevé
- GHI moyenne supérieur à 6 kWh/m² jour
- Un maximum de 7,69 kWh/m² jour en Juillet.

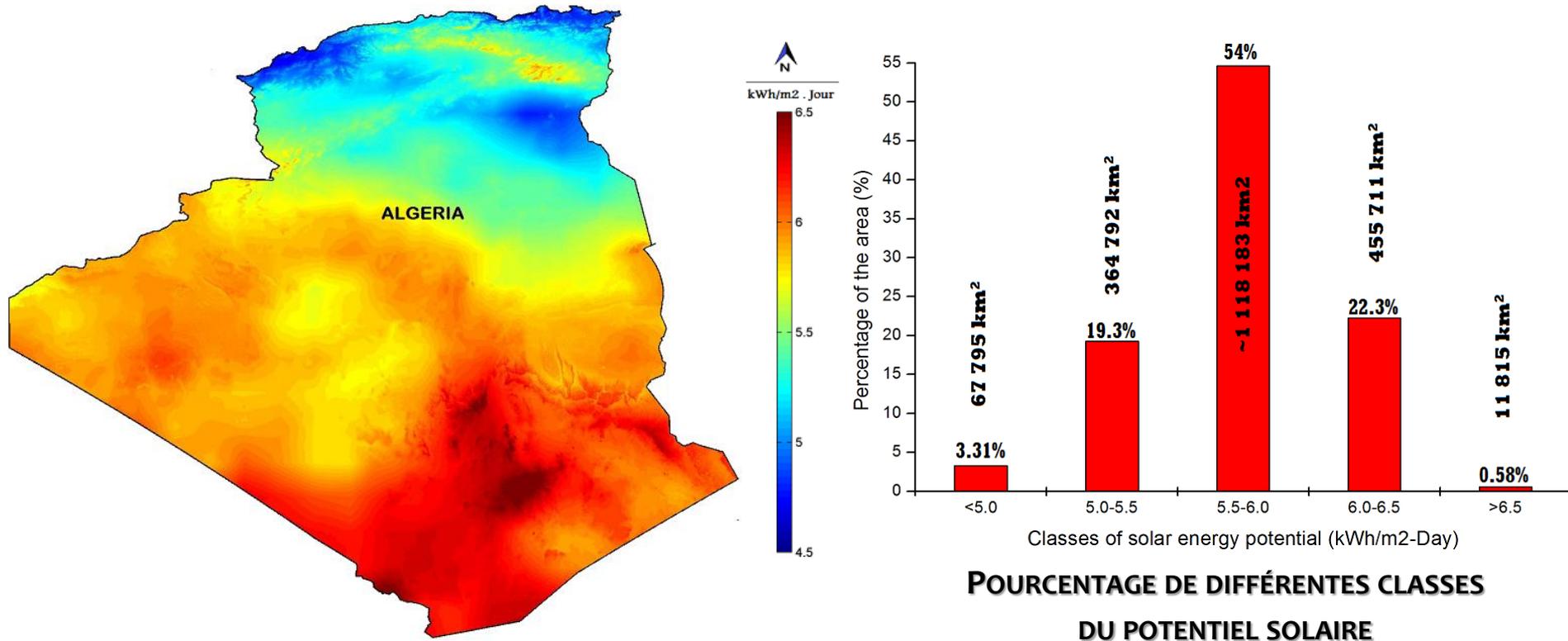
Grandeurs statistiques des moyennes mensuelles de l'irradiation journalière.

Période	Global irradiation (kWh/m ² Jour)		
	Rang	Moyenne	Std
Janvier	2,35-4,81	3,72	0,58
Février	3,25-4,94	4,79	0,58
Mars	4,39-7,18	5,90	0,53
Avril	5,48-8,01	6,92	0,42
Mai	6,25-8,60	7,38	0,33
Jun	6,82-8,71	7,66	0,28
Juillet	6,99-8,63	7,69	0,31
Aout	6,09-8,16	7,06	0,36
Septembre	4,90-7,39	6,05	0,40
Octobre	3,51-7,17	4,84	0,53
Novembre	2,51-5,14	3,85	0,58
Décembre	2,04-4,44	3,36	0,58
Annuelle	4,63-6,89	5,77	0,36

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

Résultats & Discussions

- Cartographie de la variabilité spatiale de la moyenne annuelle de GHI
 - Le potentiel solaire est important, variable d'une région à une autre.
- La fraction du territoire où l'irradiation se situe dans l'un des 5 intervalles

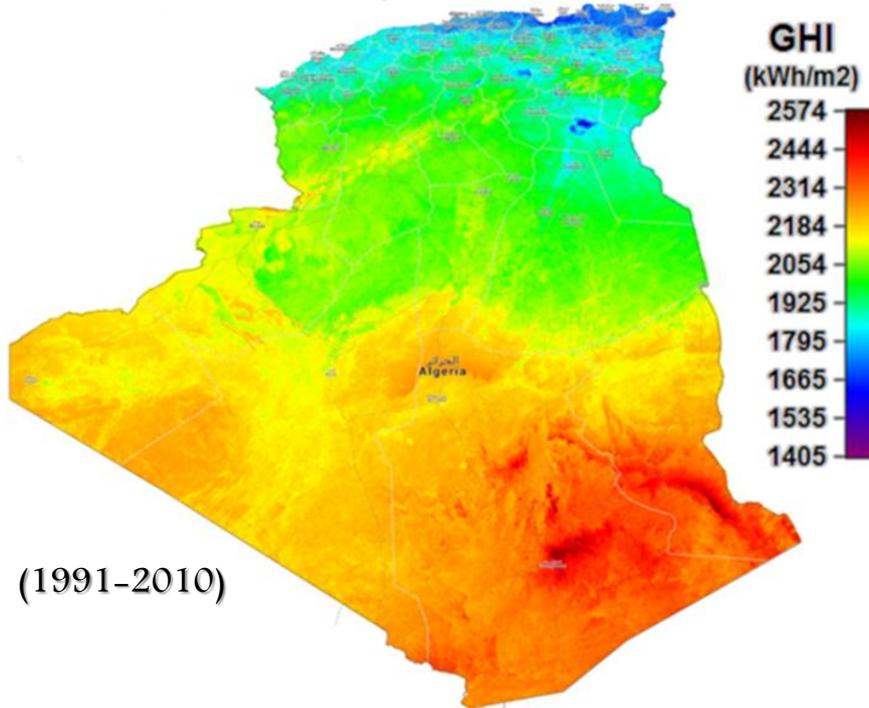


Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

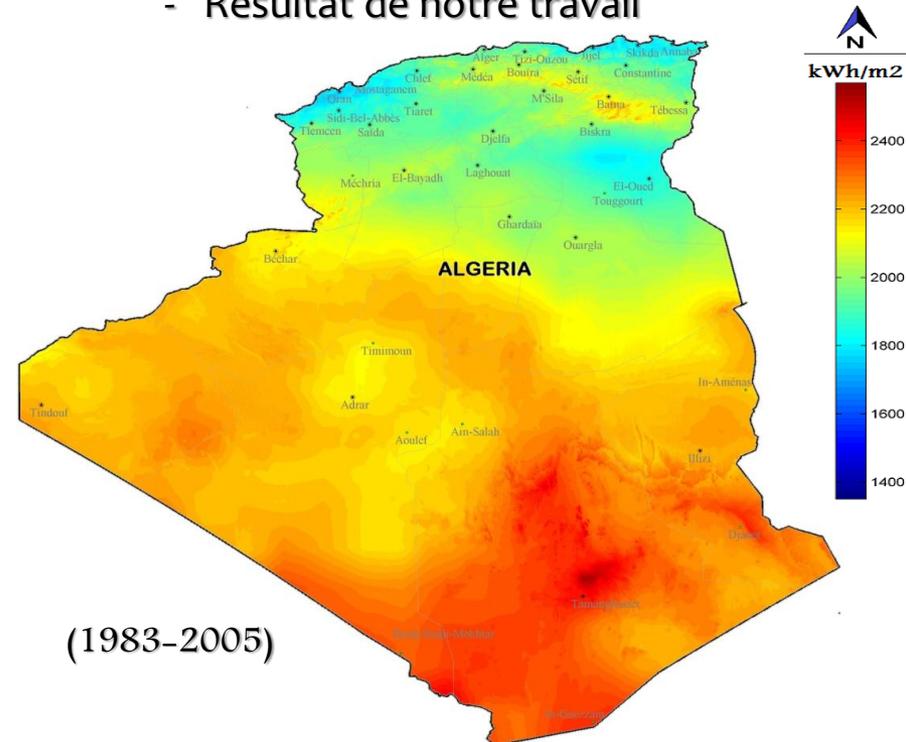
Résultats

Cartographie de la moyenne des cumuls annuels d'irradiation globale

- Atlas du Project de SolarMed



- Résultat de notre travail



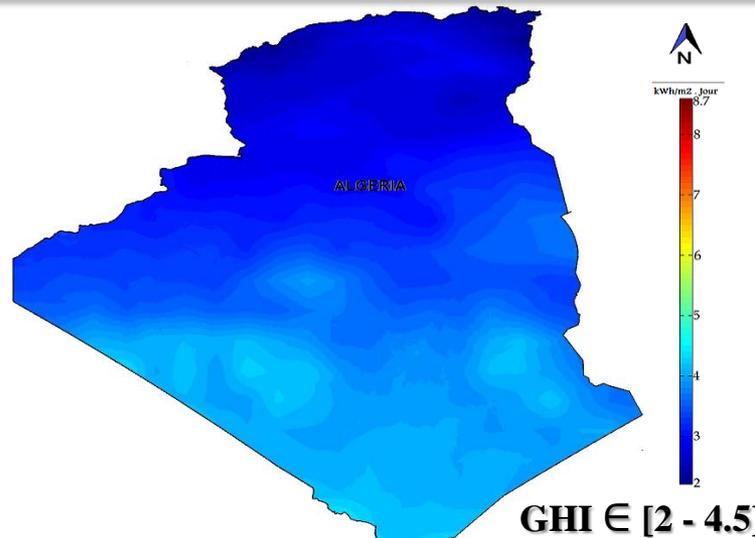
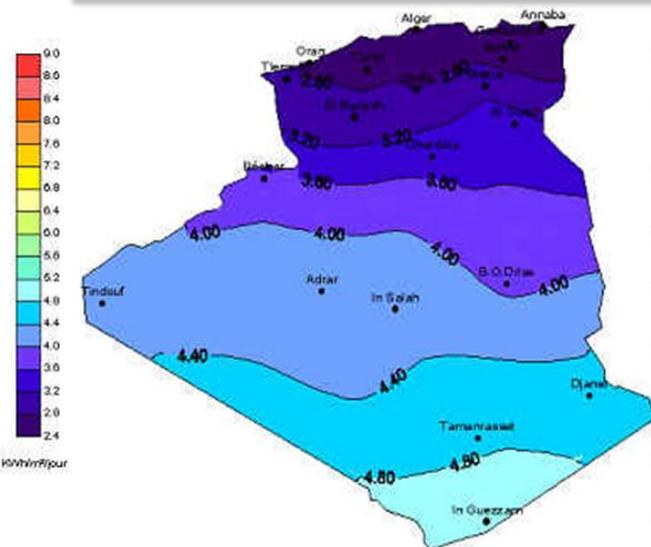
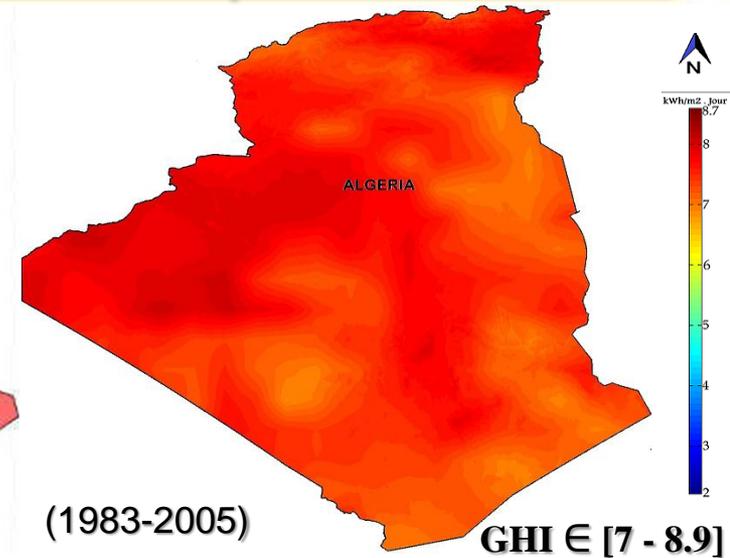
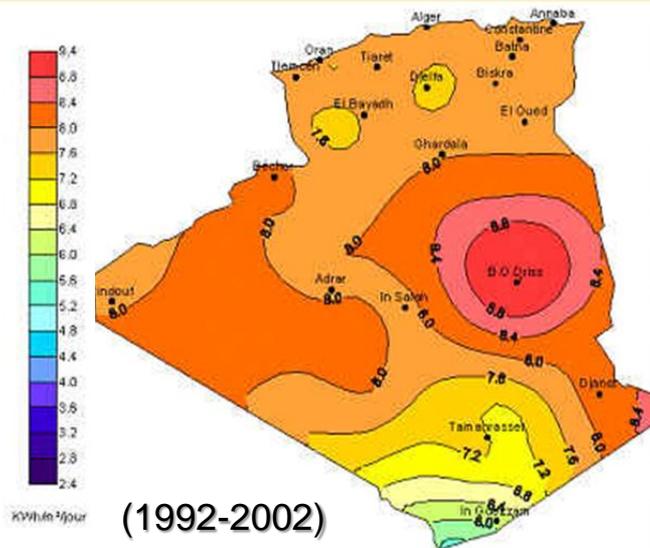
- Bonne similitude entre les deux cartes.
- Les structures spatiales des irradiations sont convenablement reproduites.
- Maximales et minimales sont bien localisées, avec une légère surestimation.

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

Pour Mémoire :

Moyennes mensuelle des irradiations journalières,
Juillet

Mefti A. et al,(2003).



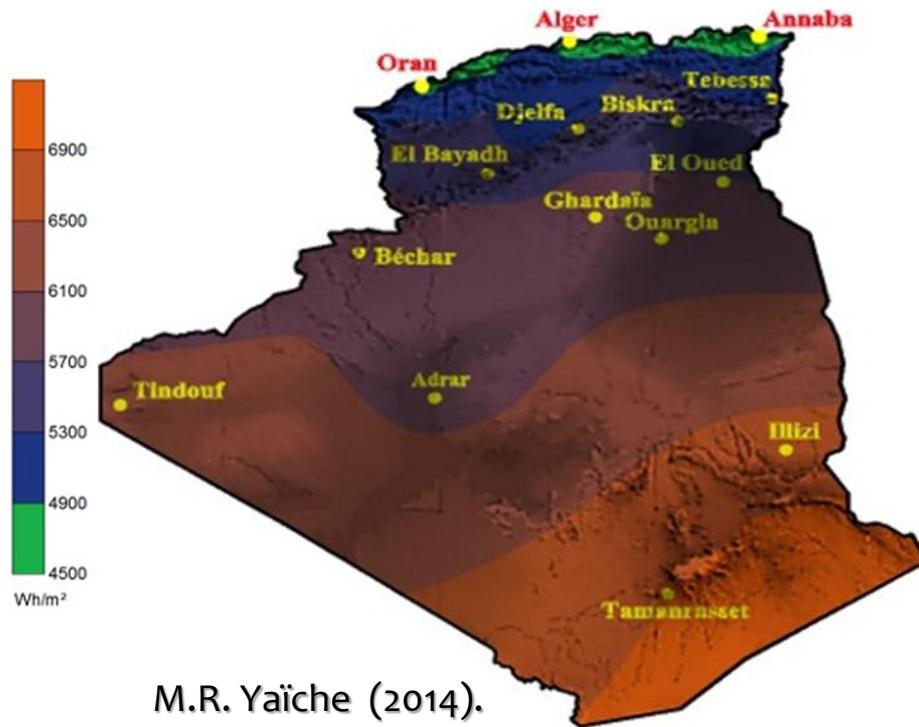
Moyennes mensuelle des irradiations journalières,
Décembre

Cartographie spatio-temporelle du rayonnement global horizontal

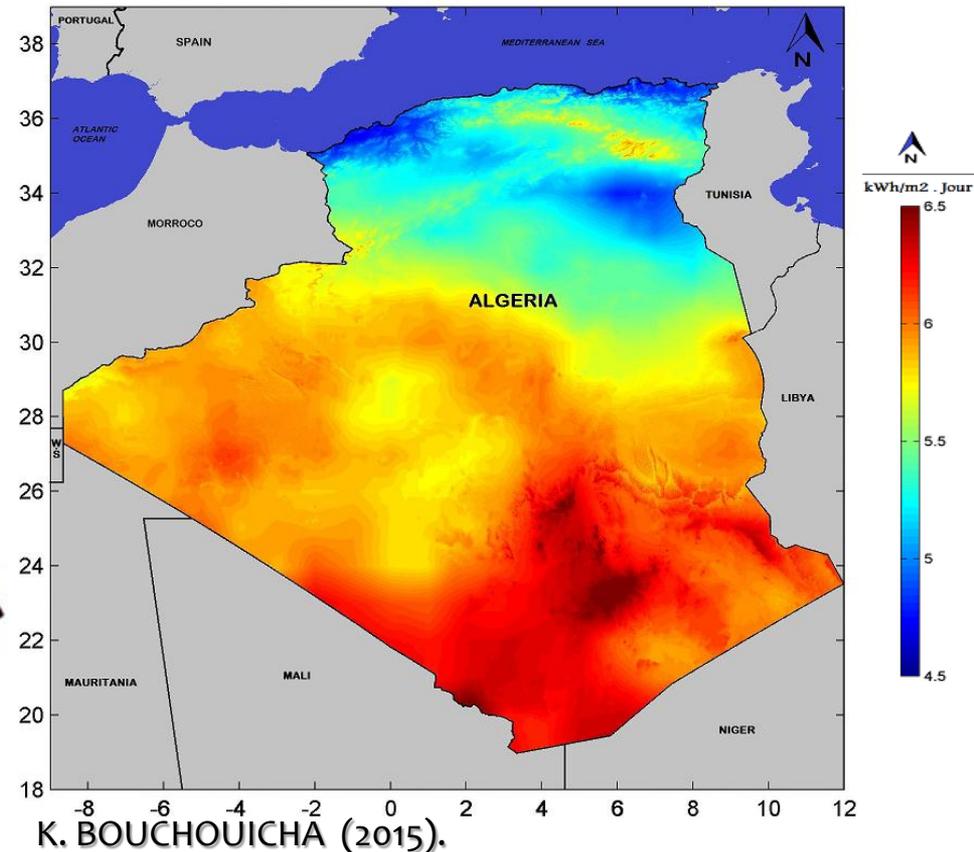
- PROBLÉMATIQUE
- PLAN
- ANALYSE ET MODÉLISATION DU RAYONNEMENT
- EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITAIRES
- CARTOGRAPHIES DU RAYONNEMENT**
- CONCLUSIONS

Pour Mémoire :

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002



Moyennes annuelles des irradiances journalières, période (1983-2005)



❑ Analyse et modélisation du rayonnement global

- Faible densité du réseau de mesure radiométrique
- Développement des méthodes d'estimation classique basées sur des données météorologiques

❑ Exploitation des observations satellitaires

- Cartographie de l'albédo de surface - Traitement et combinaison de deux canaux visibles
- Une analyse géospatiale
- Estimation des irradiations en valeurs horaires et journalières par deux approches

❑ Climatologie du rayonnement solaire

- Cartographie annuelle et mensuelle du rayonnement global à haute résolution spatiale
- Ces nouvelles cartes sont d'une qualité équivalente aux cartes réalisées

- ❑ Exploitation de ces sources de données
 - Permet de pallier partiellement le manque d'observations au sol ;
 - Une estimation plus précise ; pour des échelles spatiales plus fines.
 - Etablir un atlas du rayonnement solaire pour chaque région.

- L'énergie solaire peut être valorisée au Nord comme au Sud, mais les installations de grandes capacités sont plutôt recommandées pour la région Sud du pays où le taux d'irradiation solaire est plus élevé.

□ Afin d'améliorer les résultats :

- Utilisant des données coïncidentes sol-satellite sur une plus longue période
- Utilisation des données du profil vertical des différents constituants atmosphériques pour améliorer la modélisation du rayonnement à ciel clair
- Intégration des images satellites à plus haute résolution spatiale et temporelle
- Le nombre de canaux spectraux utilisés devraient être augmentés, l'albédo du sol sera mieux estimé.
- De plus, l'utilisation d'un albédo de surface à plus haute fréquence temporelle, l'albédo obtenues grâce aux images MODIS peut être très important.

- ❑ Sur le plan national, des projets pilotes de centrales thermiques à concentration solaire (CSP : Concentrating Solar Power) sont prévus

La réalisation nécessite :

- Une meilleure connaissance de la distribution spatiale et temporelle de la composante directe normale du rayonnement solaire
- ✓ Nécessaire pour évaluer l'éclairement global incident sur plan incliné indispensable aux applications photovoltaïques.

A satellite-style image of Europe at night. The continent is illuminated from the right, with city lights visible. A bright, circular spotlight effect is centered on the Iberian Peninsula (Spain and Portugal). The surrounding oceans are dark blue. The text 'Merci de votre attention' is overlaid in white on the left side of the image.

Merci
de votre attention