

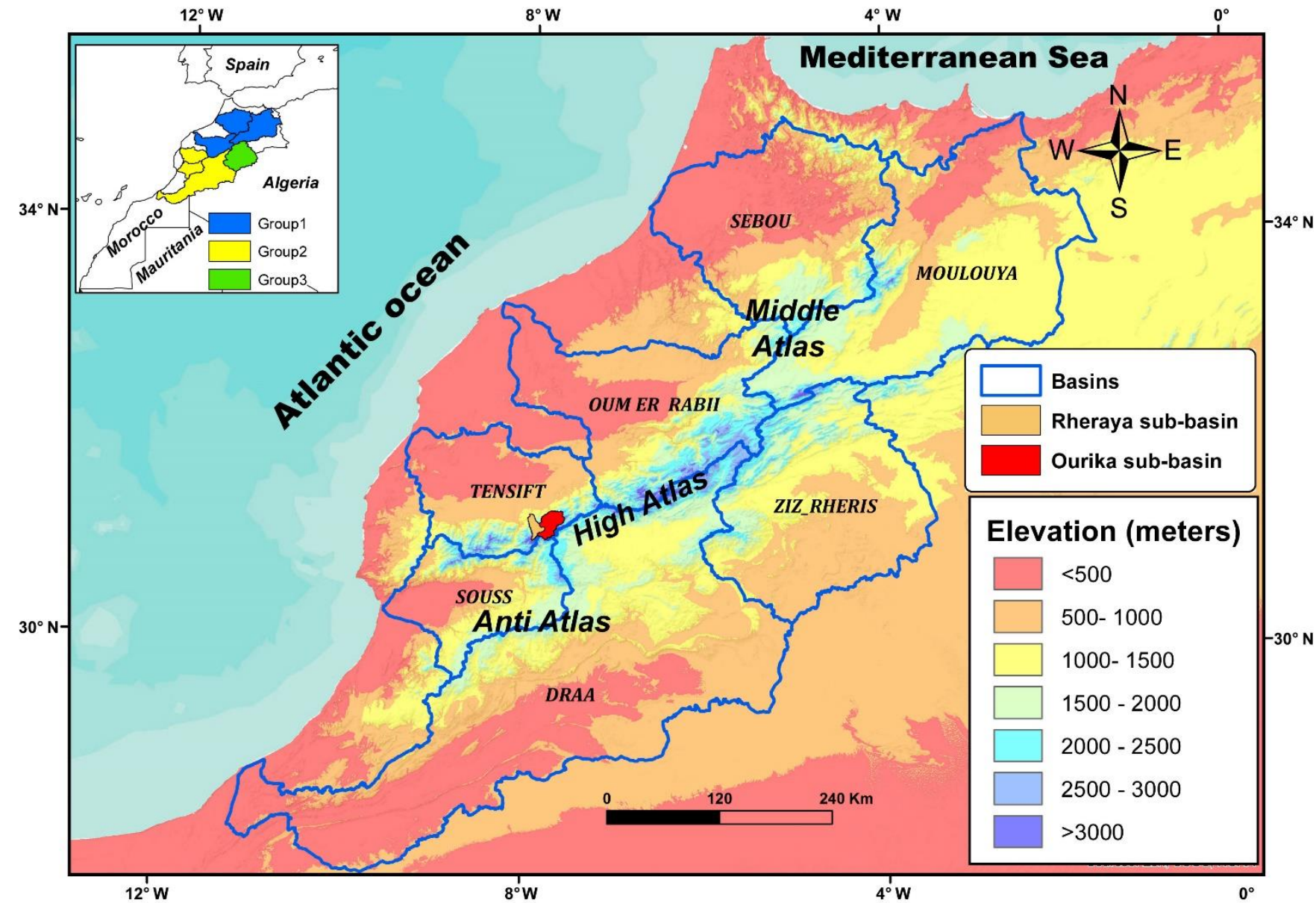
Suivi des ressources nivales sur les montagnes de l'Atlas marocain

Lahoucine HANICH



Workshop de clôture du projet
CHAAMS 4-5 juillet 2022, Toulouse





7 Bassins versants au
fonctionnement pluvio-nival sur le
Maroc



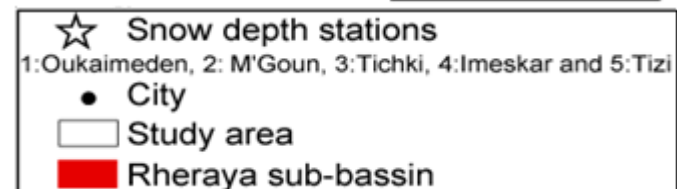
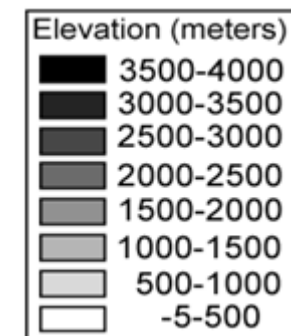
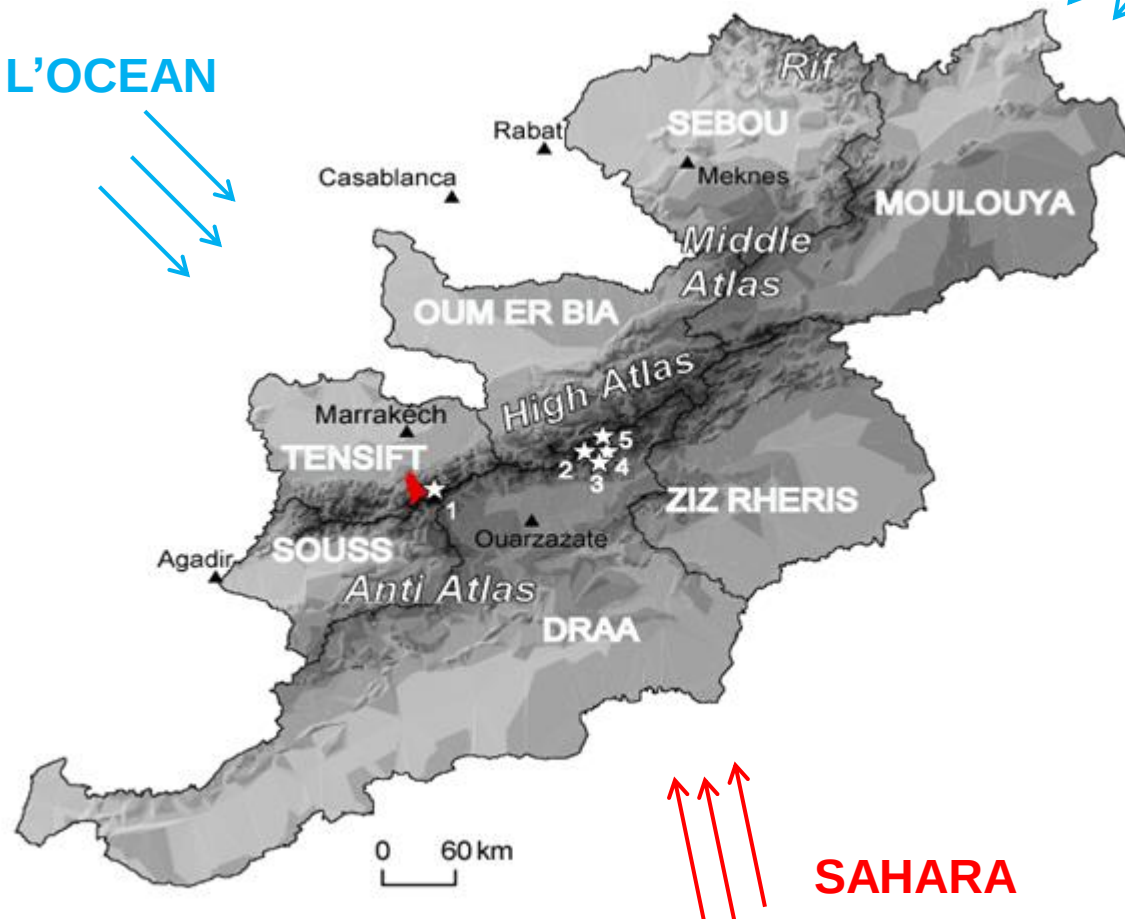
LA
MÉDITERRANÉE

■ 7 Bassins versants au fonctionnement pluvio-nival sur le Maroc



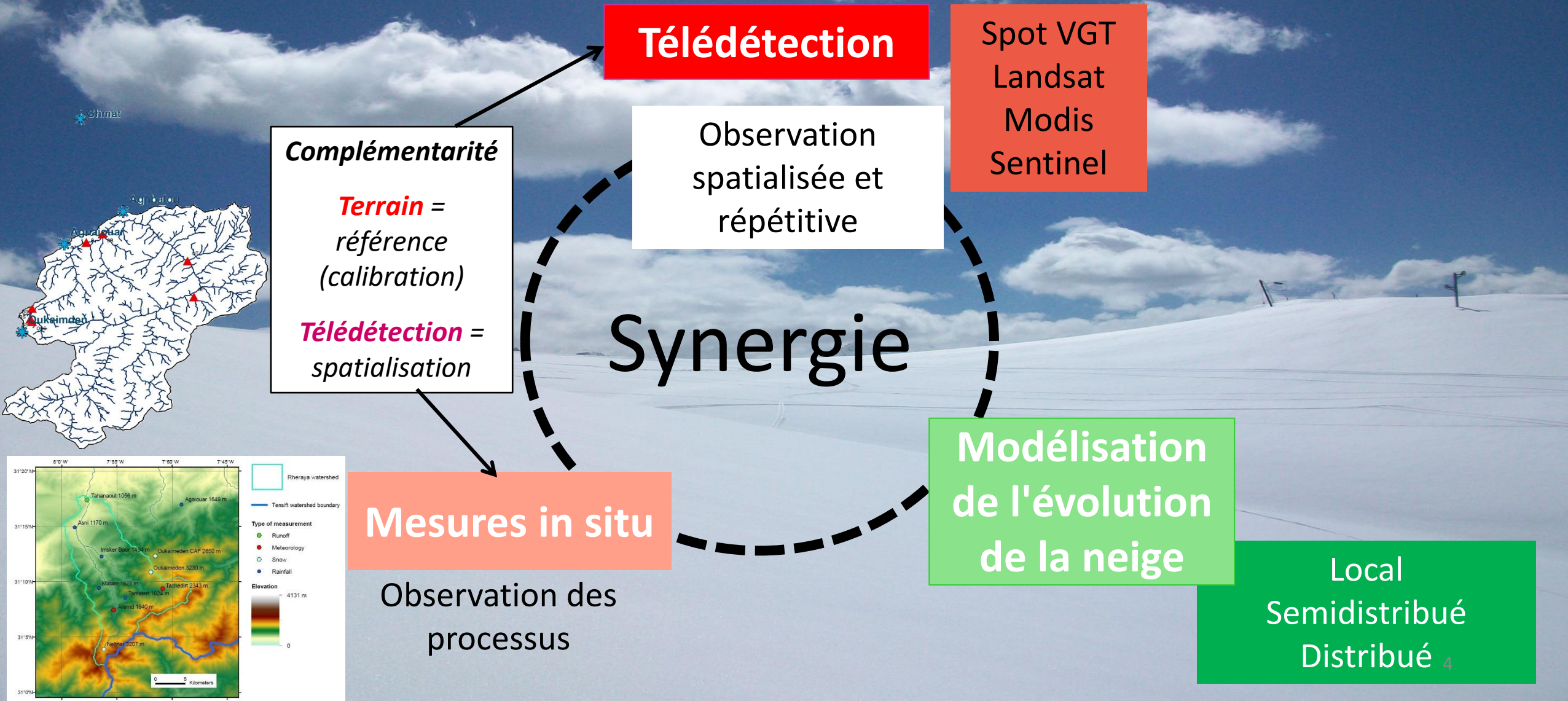
ATLAS MAROCAIN

L'OCEAN



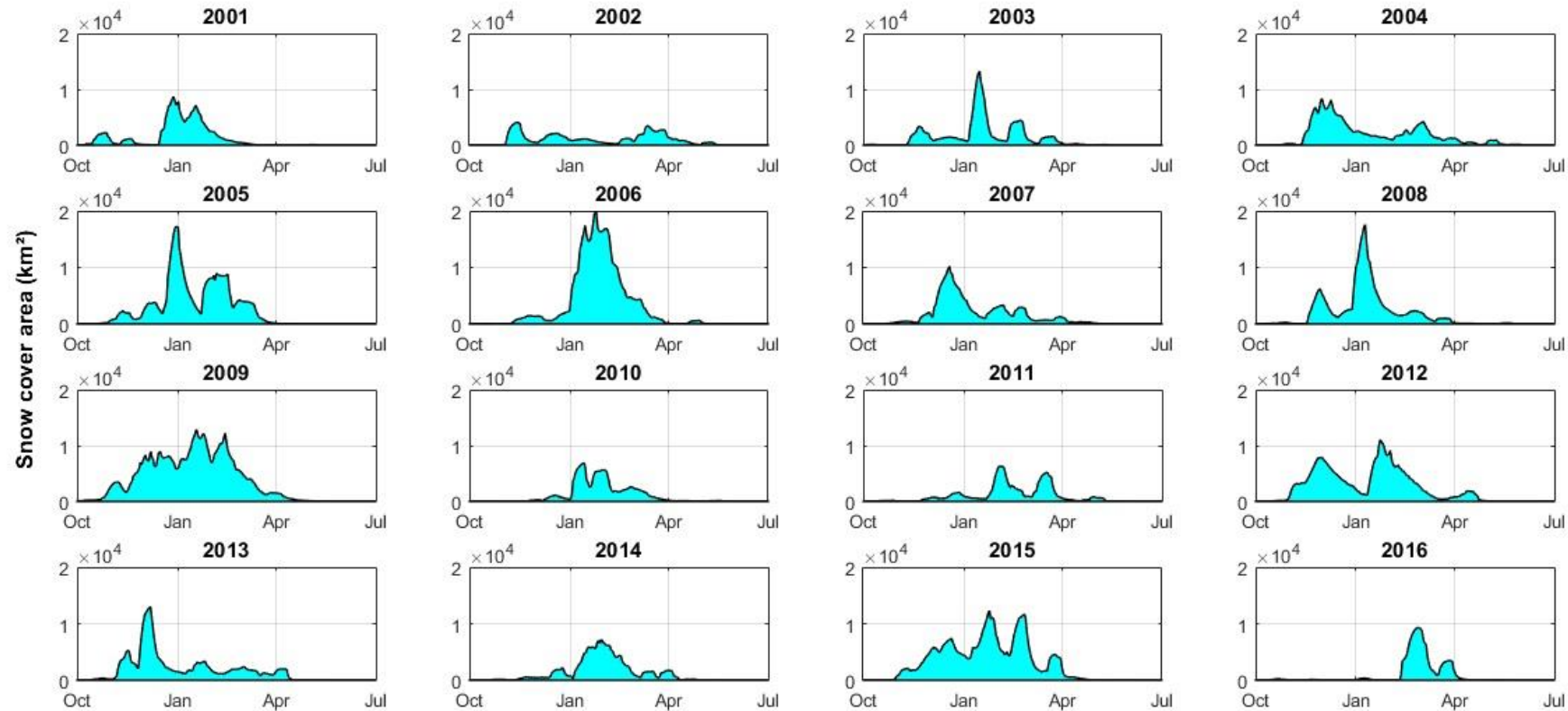
SAHARA

Approche scientifique



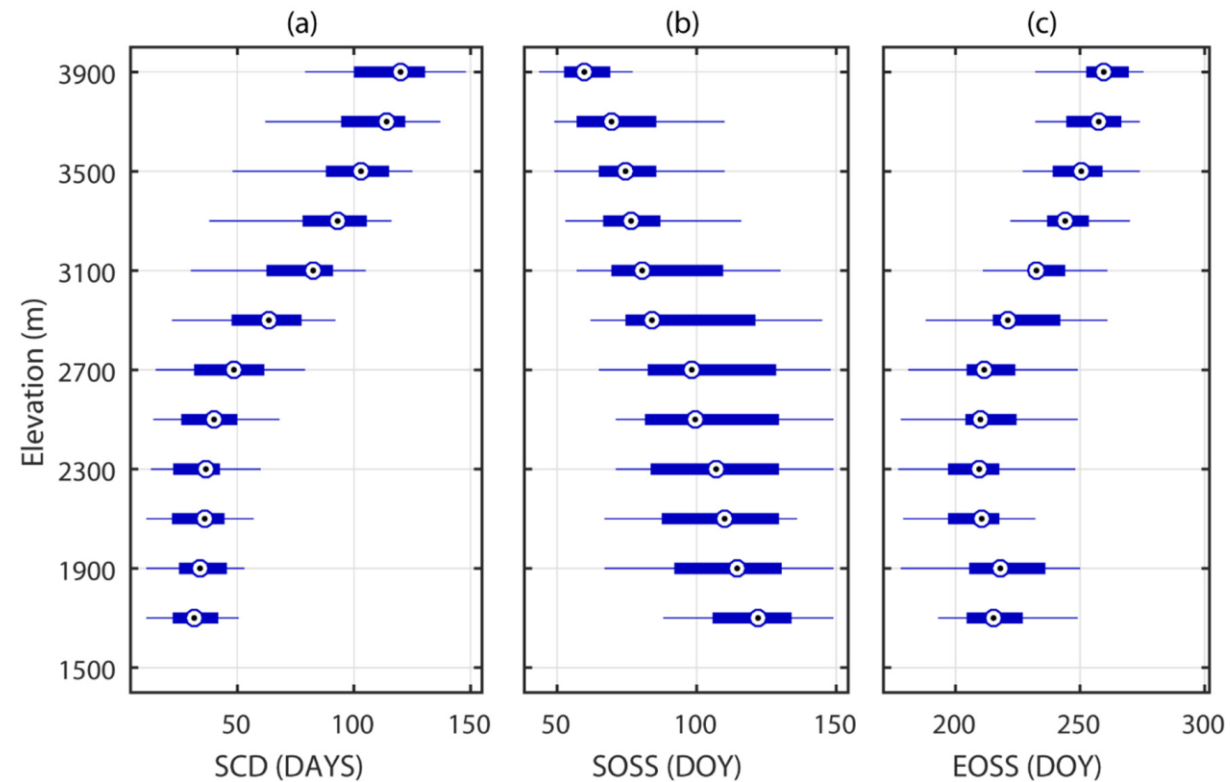
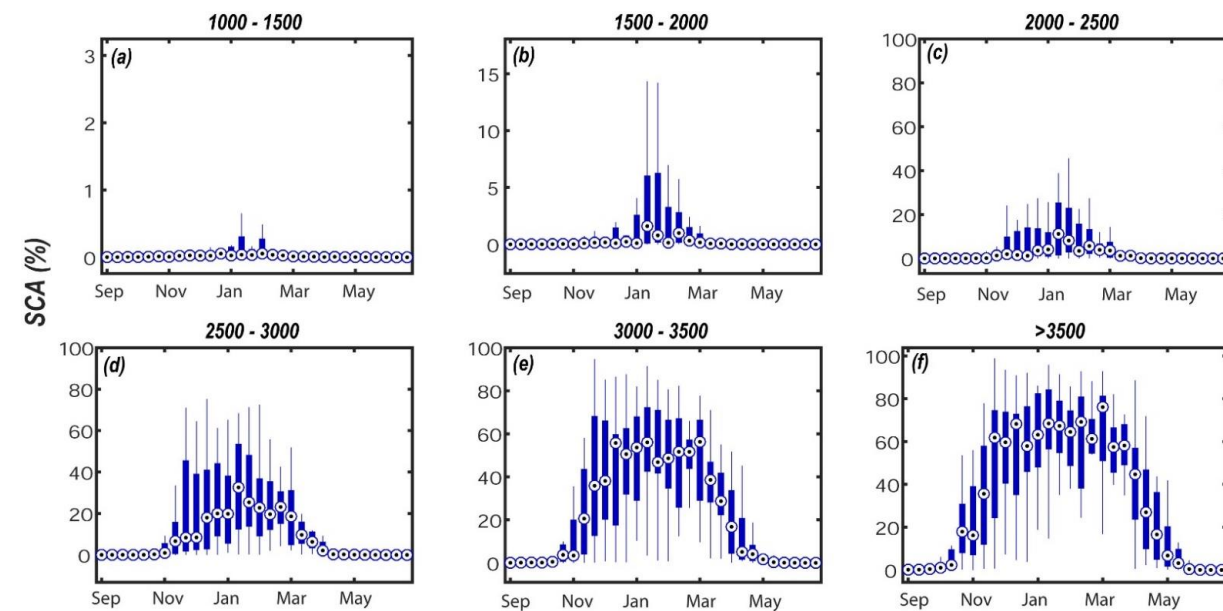
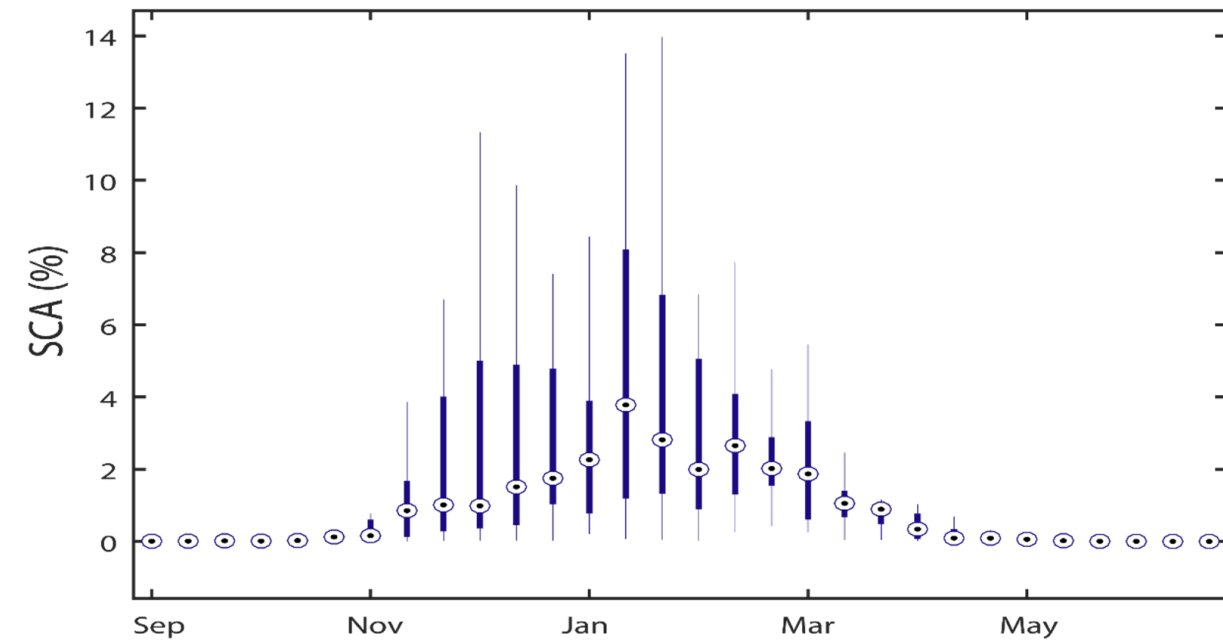
Dynamique de la couverture de neige sur les montagnes de l'Atlas Marocain par Télédétection

Moyenne mobile sur 10 jours du SCA quotidien sur l'Atlas marocain d'octobre 2000 à mai 2016
par le produit MOD10A1.



La variabilité inter et intra-annuelle est extrêmement élevée tant en termes d'enneigement maximal et total qu'en termes de répartition des événements et de durée des saisons.

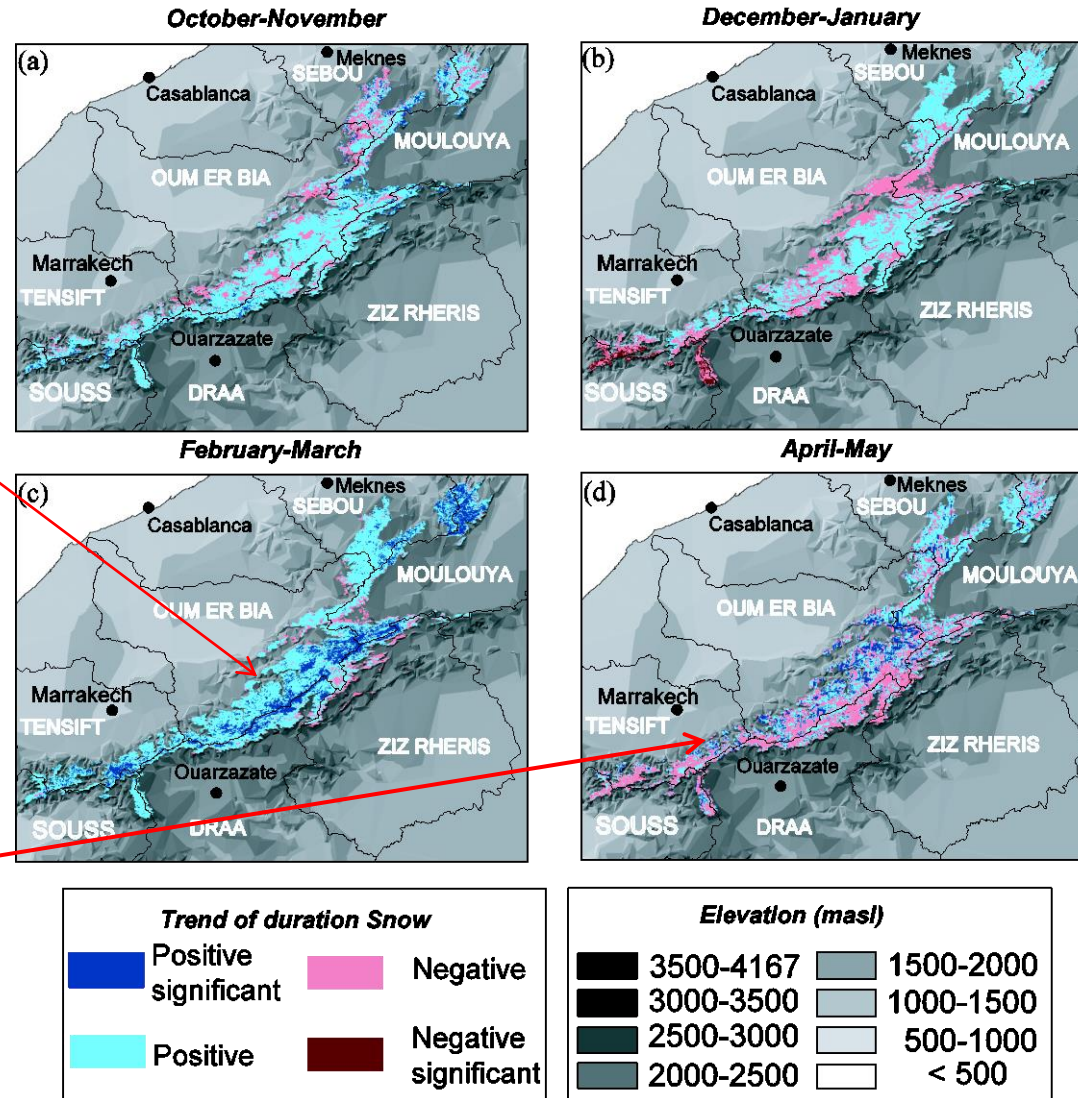
Atlas



Tendances de la durée de la couverture de neige

Analyse des tendances carte a conduit aux observations suivantes :

- Les resultats montrent une tendance a l'augmentation de la durée de neige au coeur de la saison (Février -Mars) les zones de haute altitude (au-dessus de 2500 mètres d'altitude)
- Une légère diminution de la durée de neige au printemps (en Avril et Mai)
- Résultats en accord avec Bormann et al. (2012) sur le Sud-est de l'Australie avec des conditions climatiques similaires



Signe et signification des tendances de la durée de la couverture de neige pour des périodes de 2 mois au cours de la période 2000-2013

Analyse de la variabilité interannuelle de la surface enneigée

❑ La variabilité spatio-temporel de la couverture de neige par bassins versants

Une échelle de décision pour les gestionnaires de l'eau

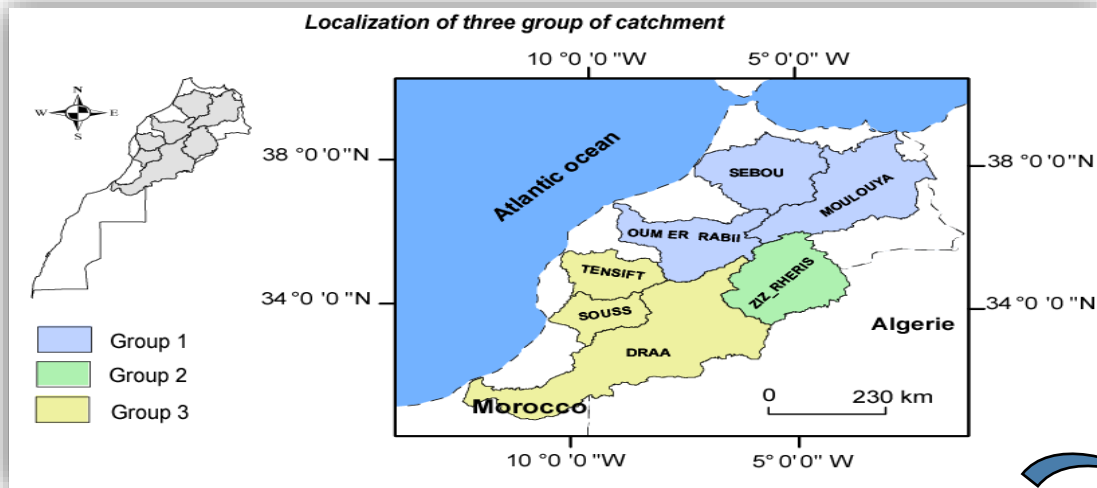
Pour identifier les bassins versant qui ont une dynamique de la couverture neigeux similaires



❑ Les séries chronologiques de SCA au niveau du bassin versant ont été regroupées en utilisant (**Cluster analysis**)

❑ **Indicateurs saisonniers** ont été calculés pour chaque groupes de variabilité temporelle cohérente (couverture de neige max, les dates de début et de fonte, la durée d'enneigement)

Variabilité interannuelle de la surface enneigée

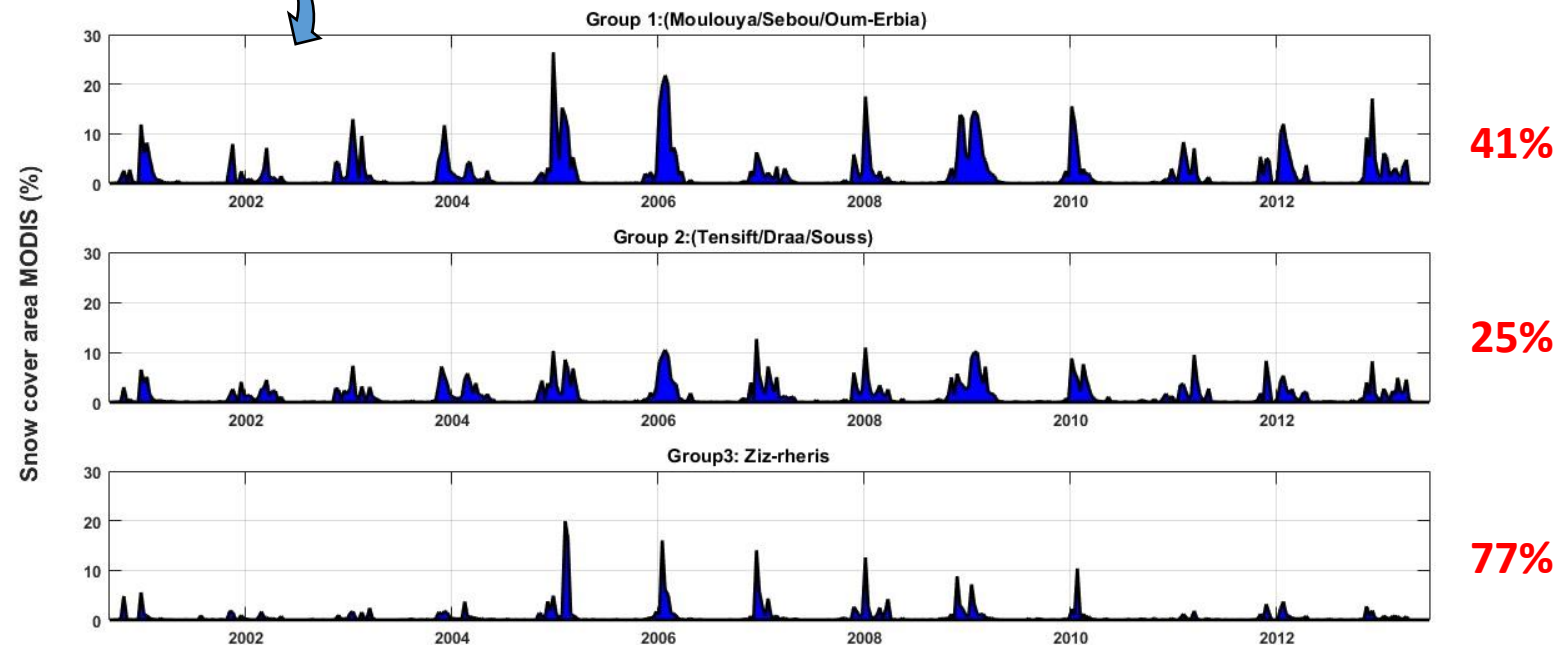


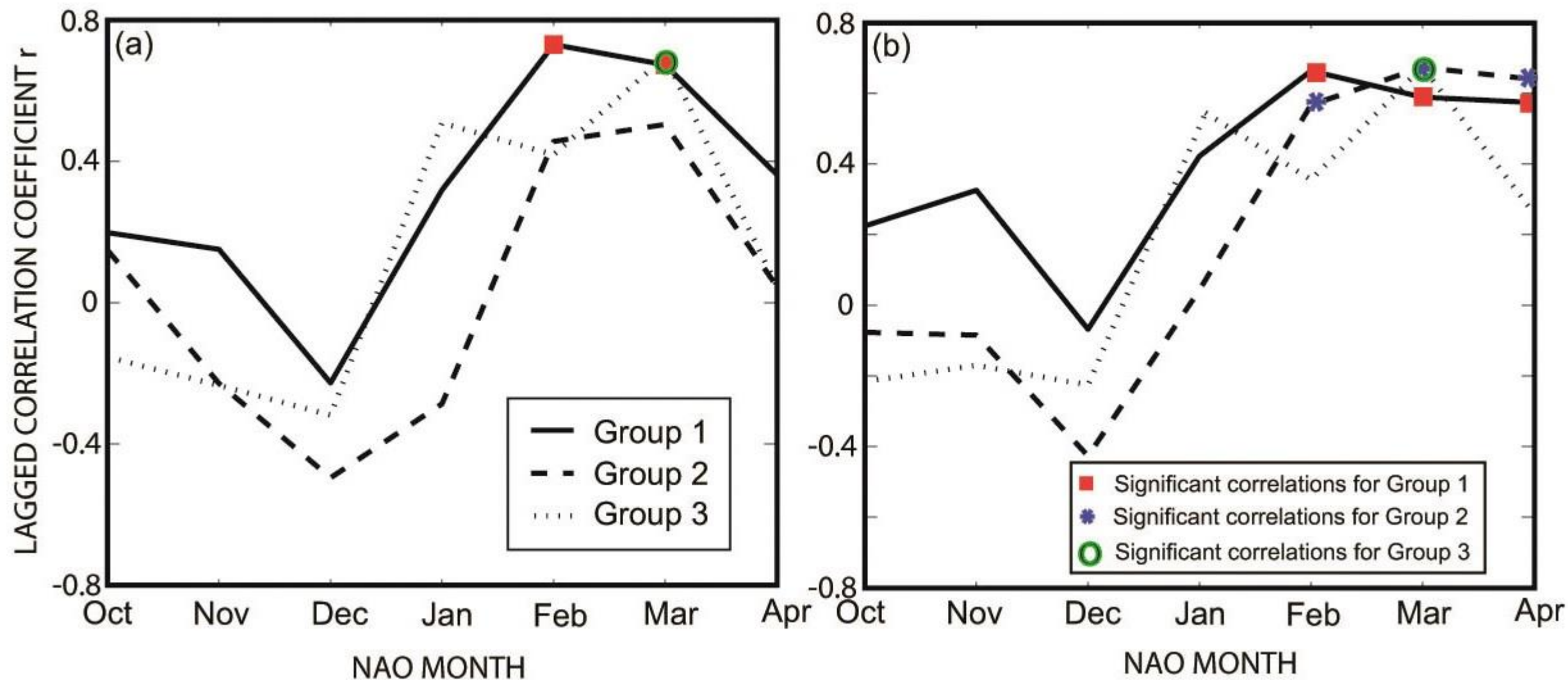
Groupe	Date de début		Date de fonte		Durée	
	Moyenne	Ecart type (jour)	Moyenne	Ecart type (jour)	Moyenne (jour)	CV (%)
1	Nov. 4 th	14	Avr. 23 th	23	170	15
2	Nov. 6 th	19	Avr. 2 nd	28	135	25
3	Nov. 26 th	29	Fev. 28 th	19	93	50

❑ Regroupement en accord avec zone climatique au Maroc (Knippertz et al, 2003.)

❑ La dynamique est caractérisée par une très forte variabilité inter-annuelle avec un coefficient de variation de la couverture neigeuse maximale de 77%.

❑ Aucune tendance significative sur aucun indicateur à l'échelle du groupe





une corrélation positive significative pour la durée de la saison de neige **(a)** et la date de fin ablation **(b)**

Dynamique de la couverture de neige sur les le Haut Atlas de Marrakech

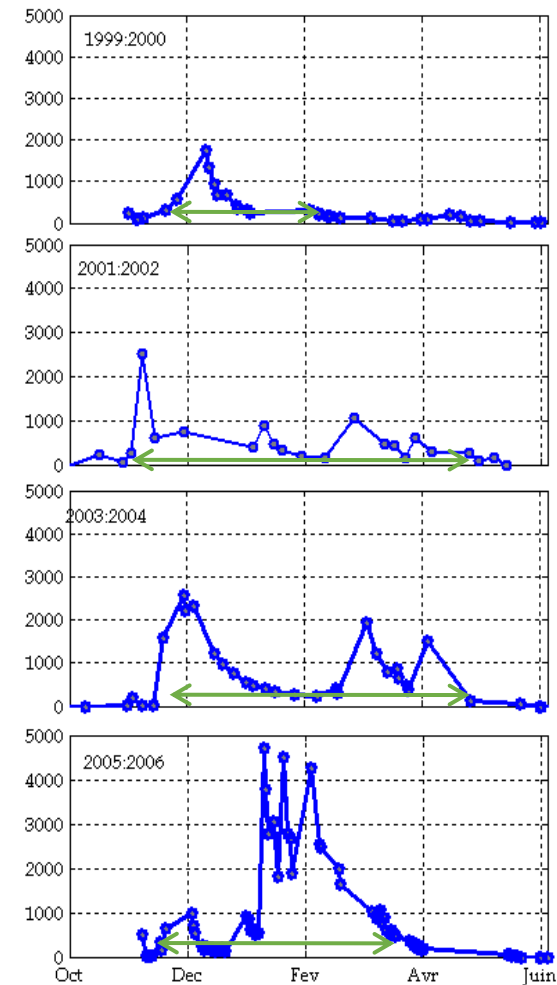
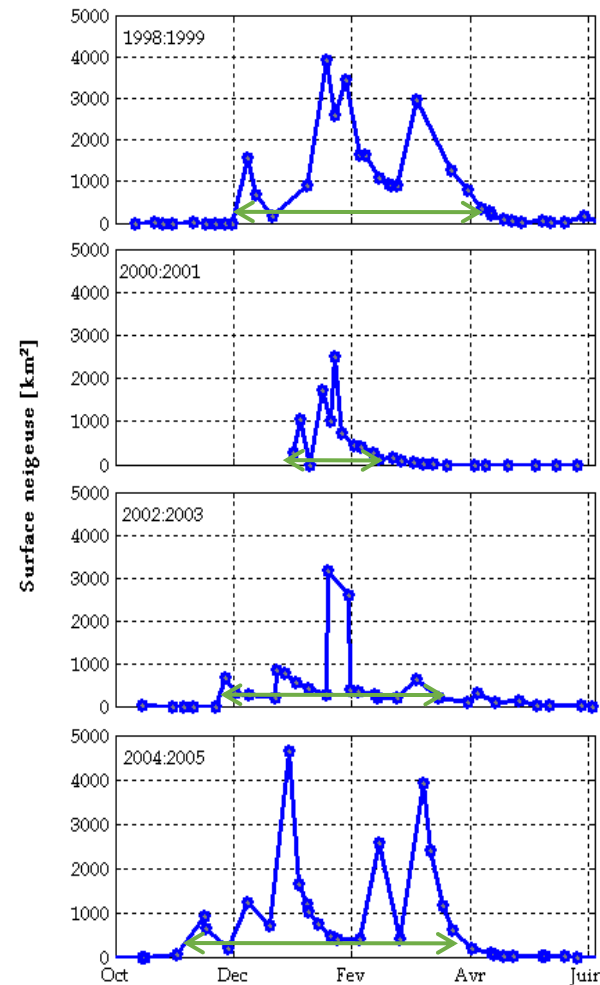
(bassin versant du Tensift)

Dynamique temporelle de l'enneigement

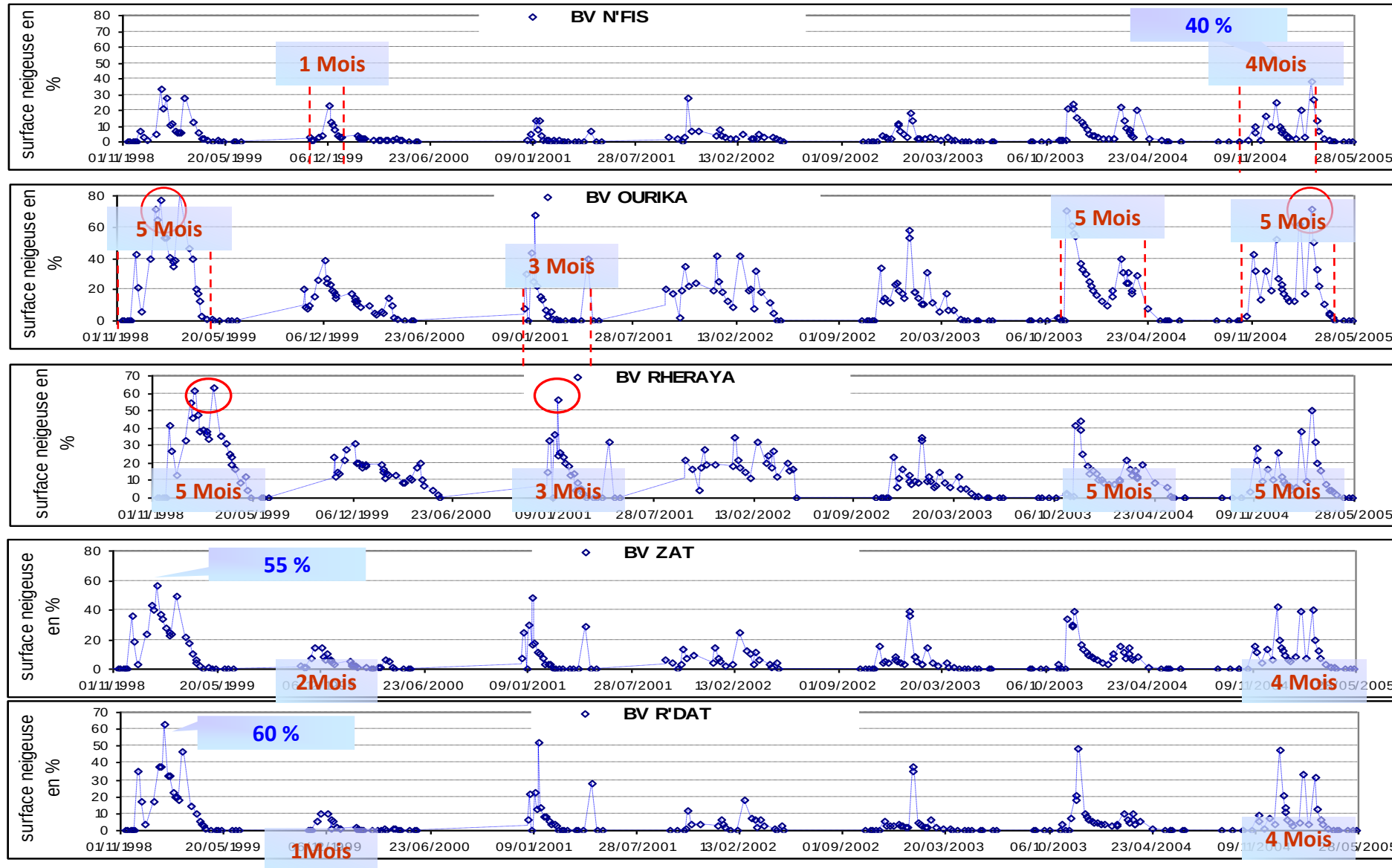
Variabilité interannuelle (1998-2006)

Images basse Résolution : *SPOT-VEGETATION*

- Début de chute
 - Nov./Déc.
- Enneigement
 - 2 à 5 mois
- Fonte totale
 - Avril

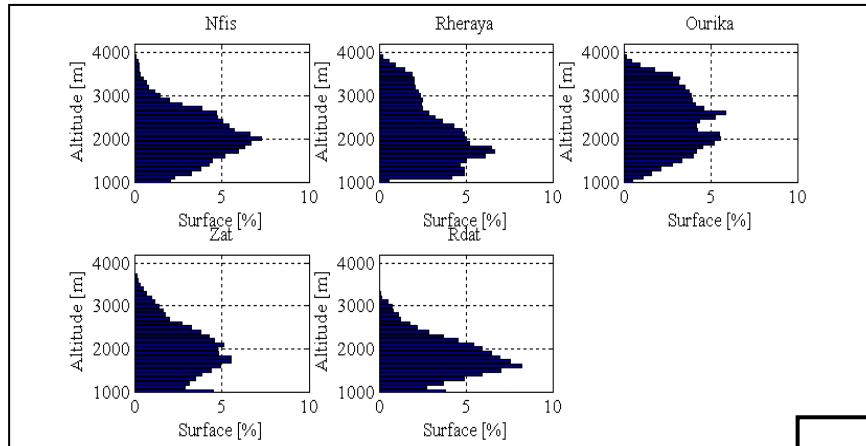
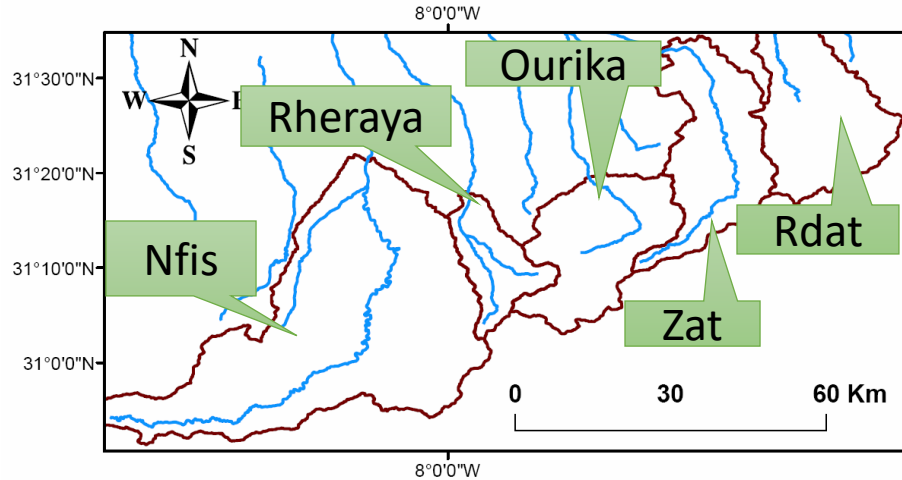


VARIATION ANNUELLE DE LA SURFACE NEIGEUSE : Par BV

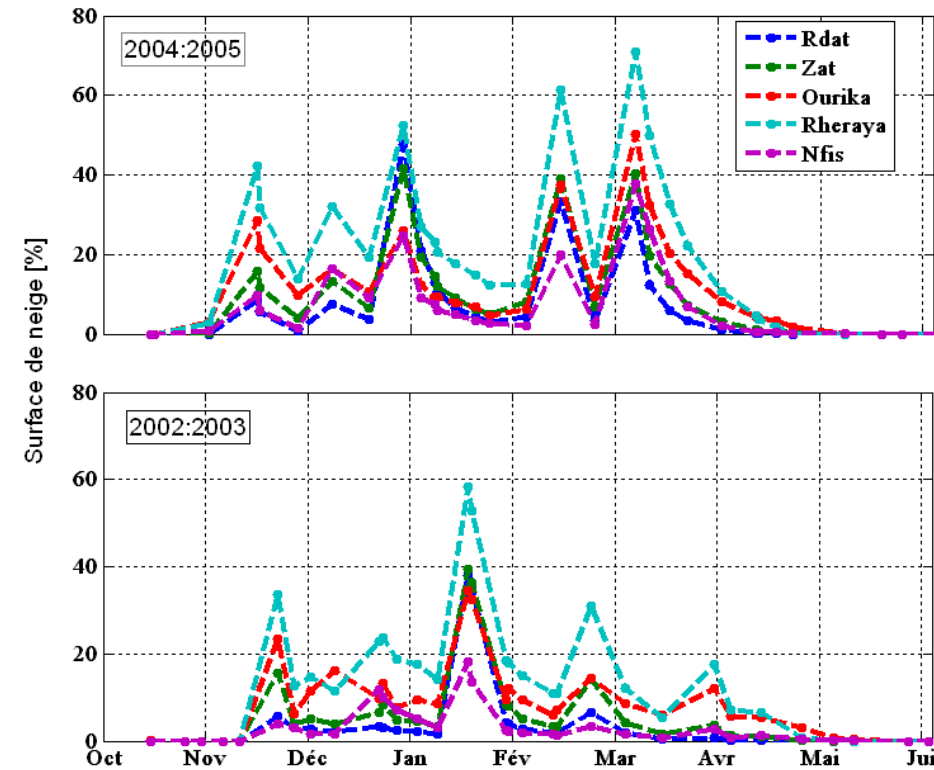


Dynamique spatiale de l'enneigement

Variabilité par bassin versant



Hypsométrie



Deux groupes:

- 1) Rheraya & Ourika : Plus enneigés
- 2) Nfis, Rdat & Zat : Moins enneigés.

Modélisation de l'évolution de la neige

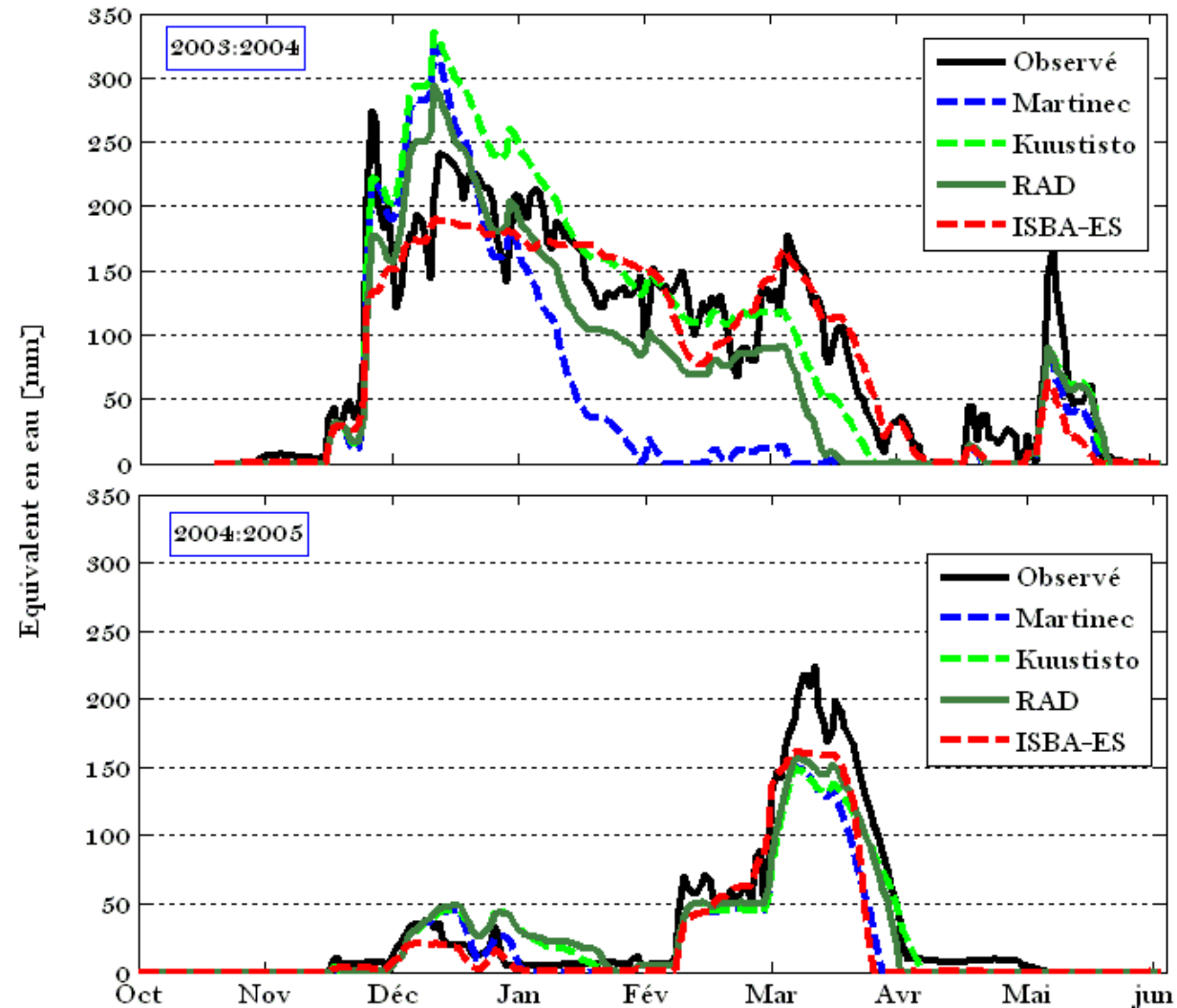
Modélisation du manteau neigeux à l'échelle local

Résultats des simulations

- Equivalent en eau

Processus hivernaux long

ISBA-ES

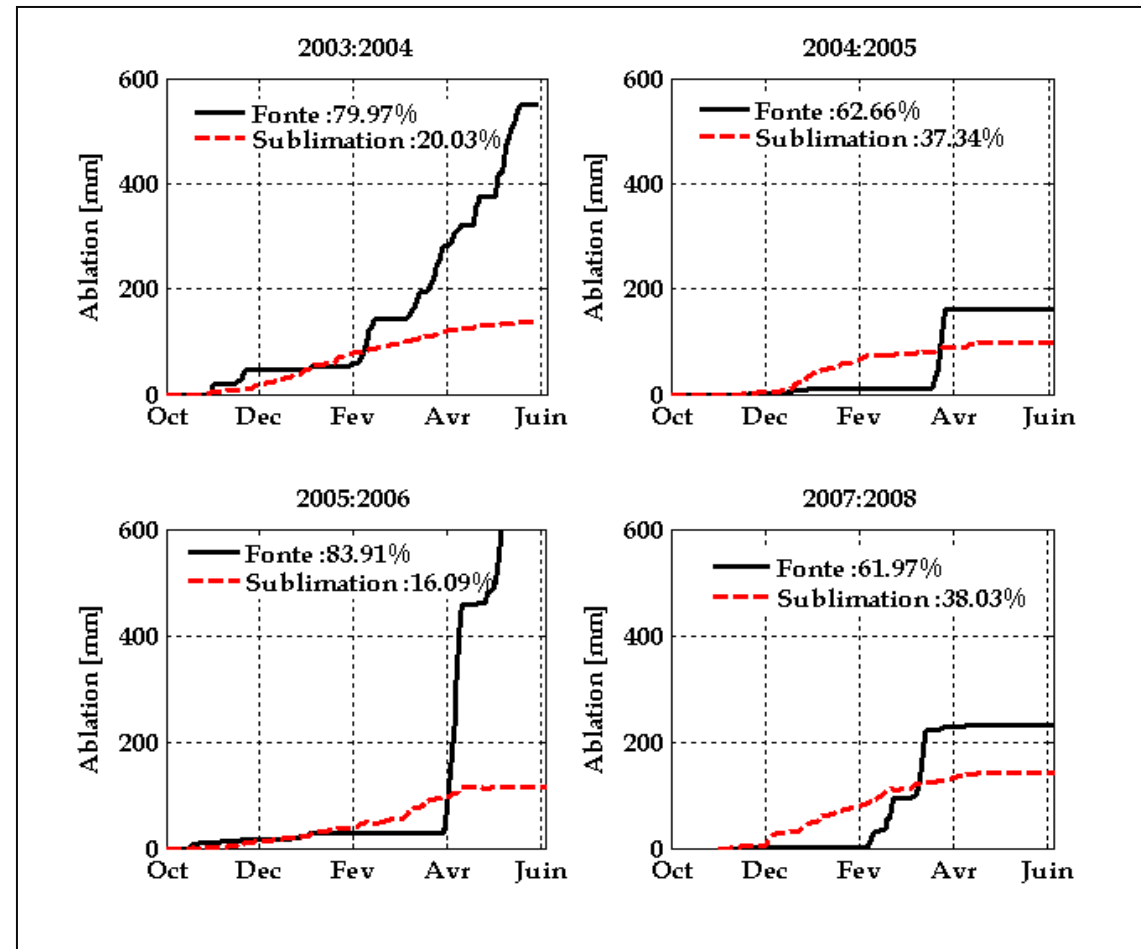


Résultats des simulations : ISBA-ES

- Processus d'ablation : *Fonte & Sublimation*

Fonte : libération brutale de l'eau dans des courtes périodes

Sublimation : régulière le long de la saison



Perte par sublimation : [16 à 37%]

Apport des eaux de la fonte des neiges aux Débits.

- ▶ *Modèle hydrologique : Snowmelt Runoff Model « SRM ».*

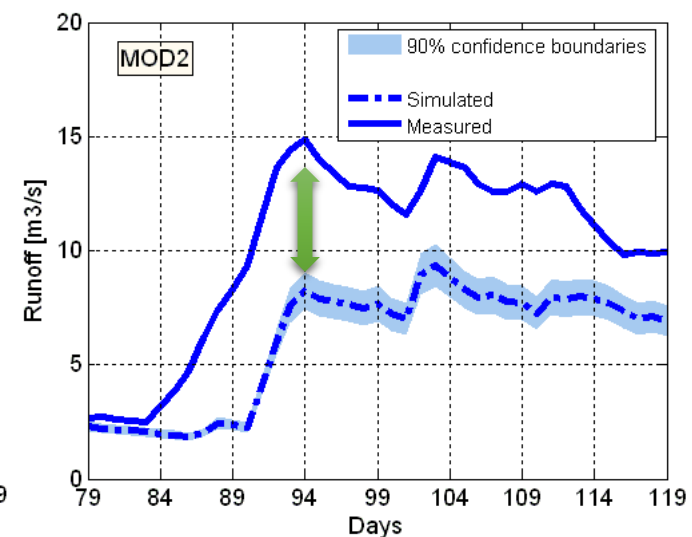
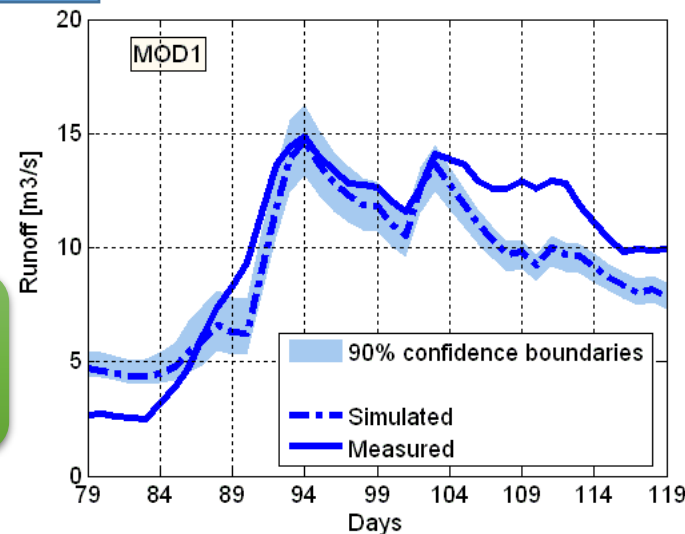
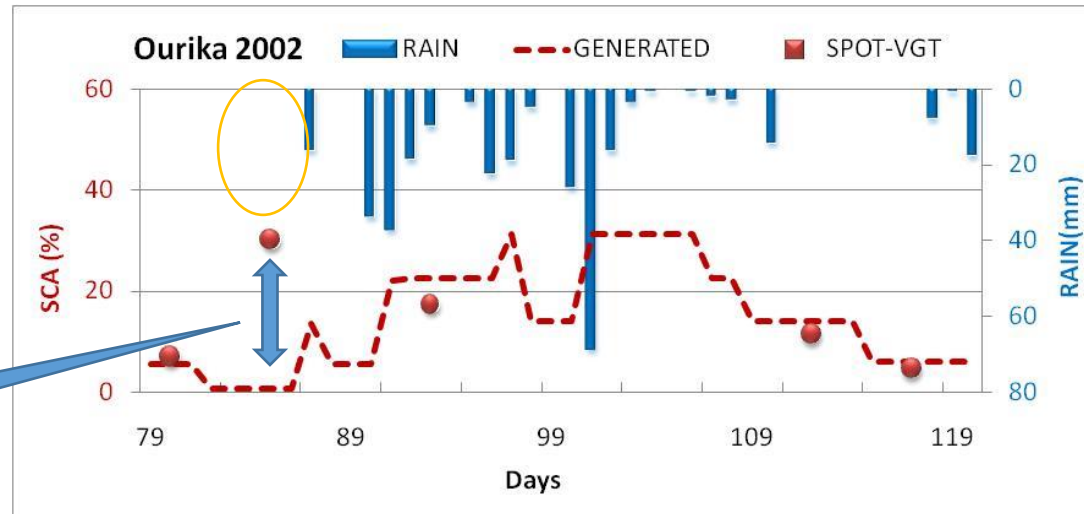
SRM : Apport de la télédétection

- Compensation des erreurs d'enregistrement des précipitations

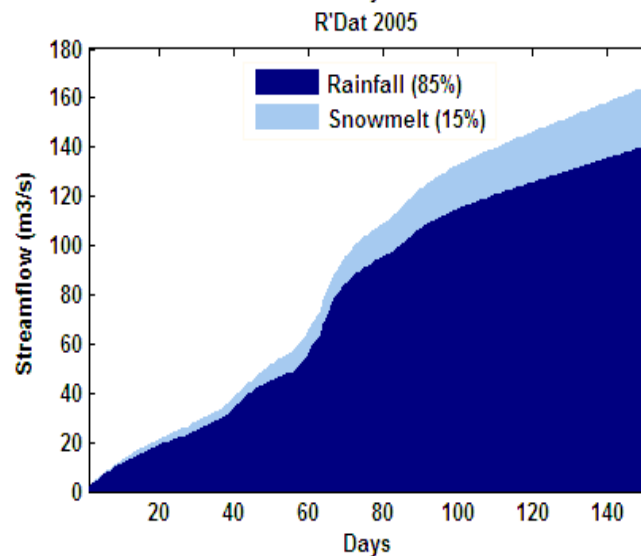
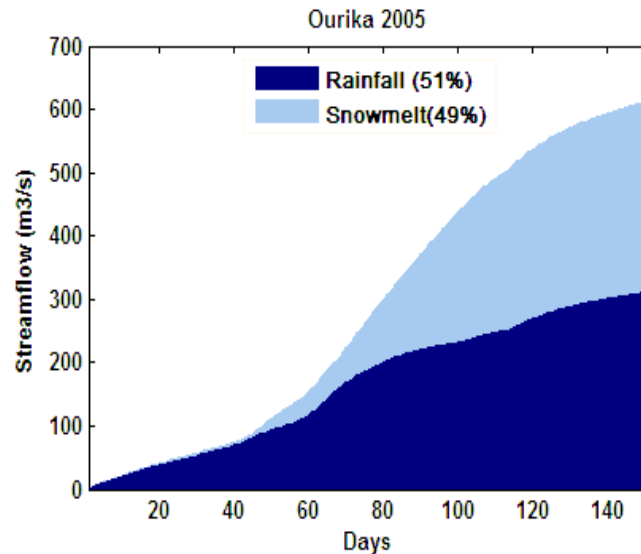
Hautes altitudes : pas d'enregistrement des P

SCA : 30% de différence

Débits : 20 % de différence pendant 3 semaines



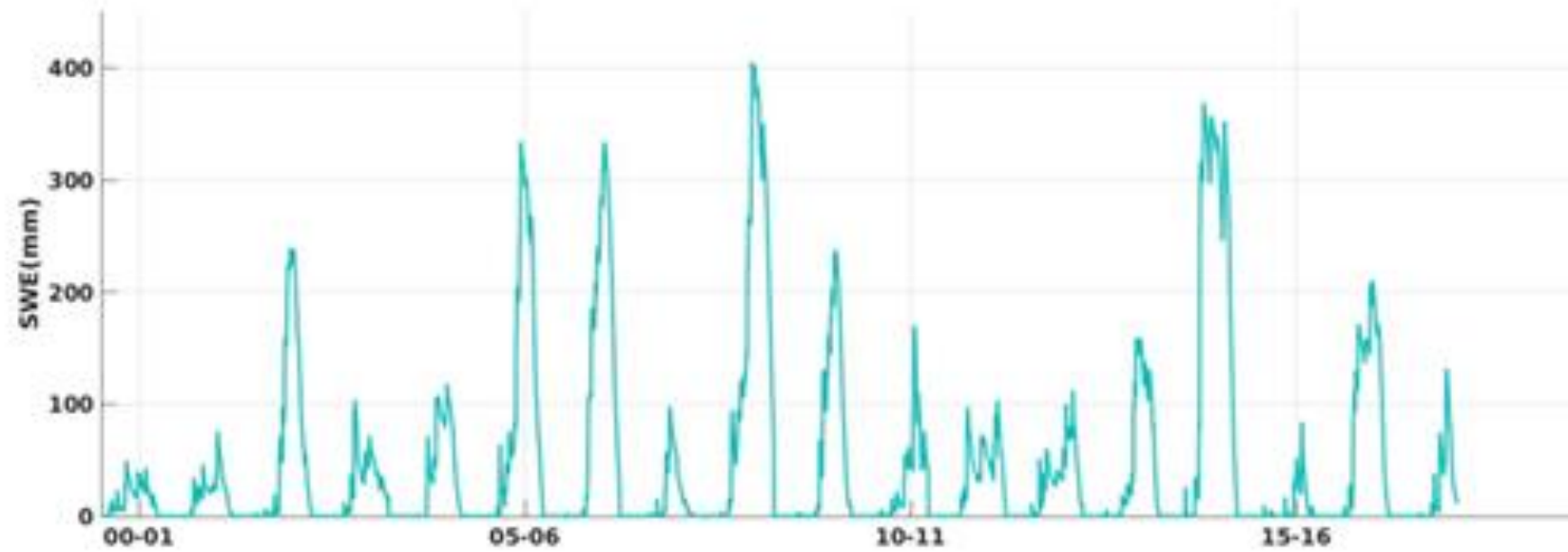
Contribution de la fonte des neiges aux débits des oueds : Modélisation

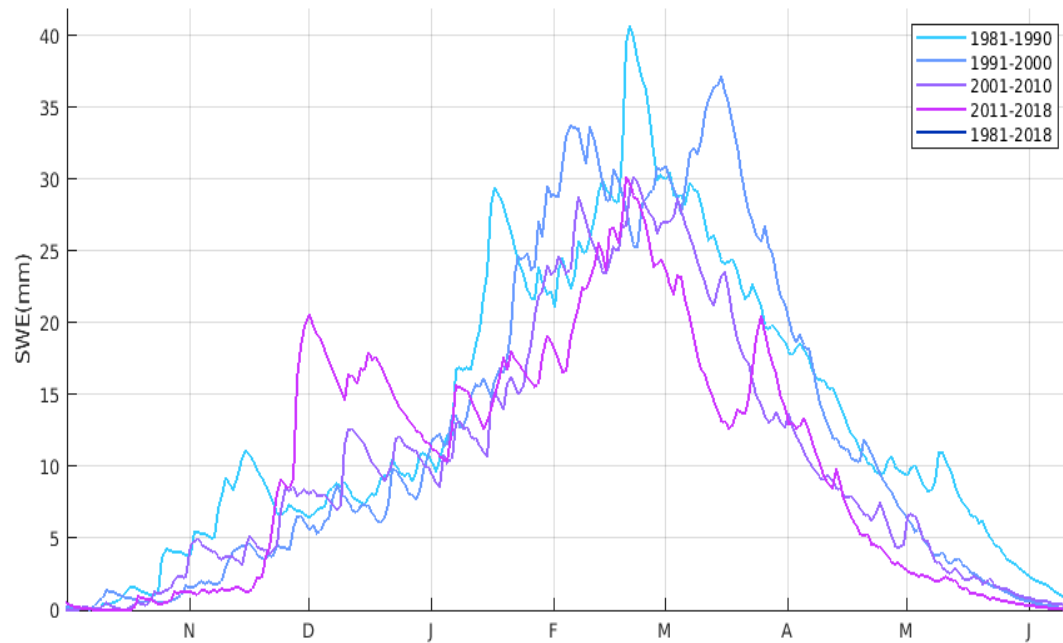


		Rainfall(%)	Snowmelt(%)
Nfis	2002	94,6	5,4
	2003	91,0	9,0
	2004	74,6	24,9
	2005	62,4	37,6
Rheraya	2002	69,2	30,8
	2003	71,1	28,9
	2004	63,4	36,3
	2005	51,4	48,6
Ourika	2002	75,3	24,7
	2003	48,6	51,4
	2004	61,9	37,7
	2005	51,0	49,0
Zat	2002	93,6	6,4
	2003	78,6	21,4
	2004	84,7	14,8
	2005	55,9	44,1
R'Dat	2002	97,5	2,5
	2003	90,2	9,8
	2004	97,6	2,0
	2005	85,4	14,6

Apport moyen de la fonte dans les 5 bassins ~ 25%

Équivalent en eau de neige (SWE) moyen modélisé (SnowModel) sur le bassin versant de l'Ourika de 2000 à 2018.





Évolution de l'équivalent en eau
moyen de la neige (mm) pour les
différentes décennies.

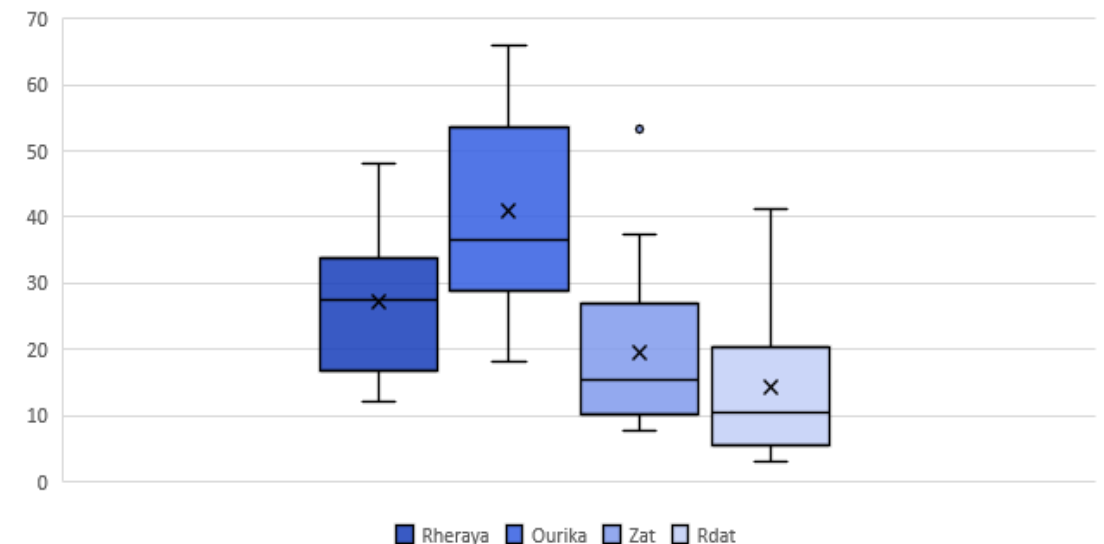
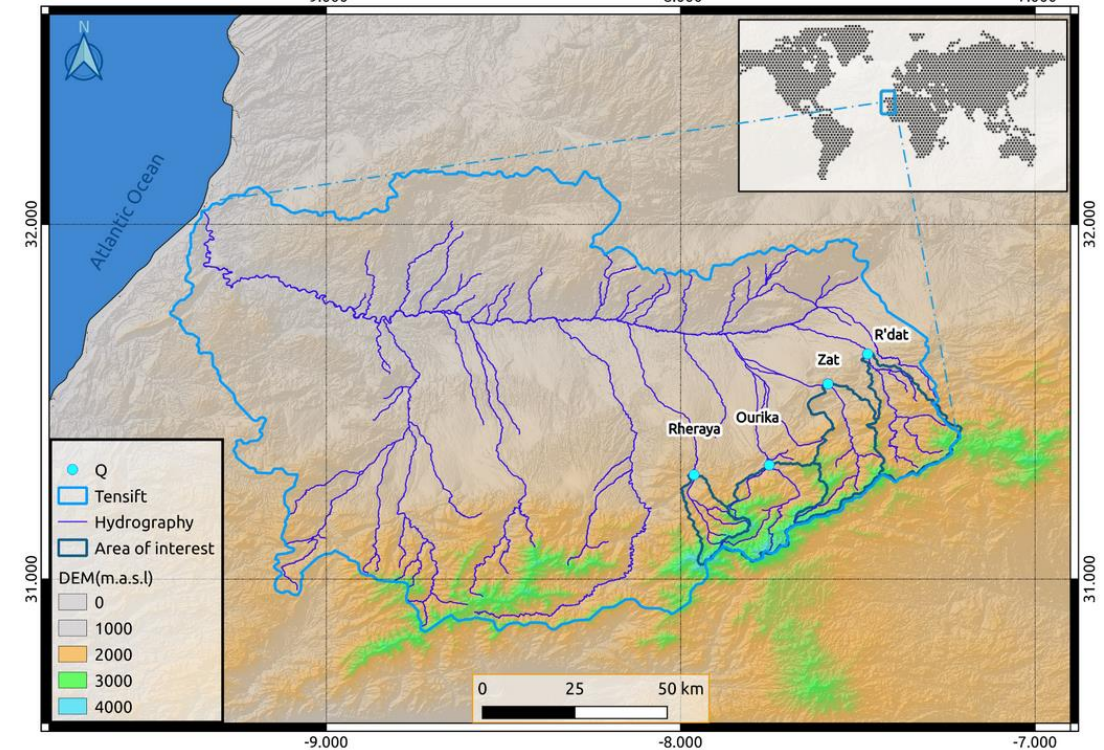
La contribution de la fonte des neiges au débit est :

Rdat la contribution moyenne est de **10 %**

Zat la contribution moyenne est de **à 15 %**

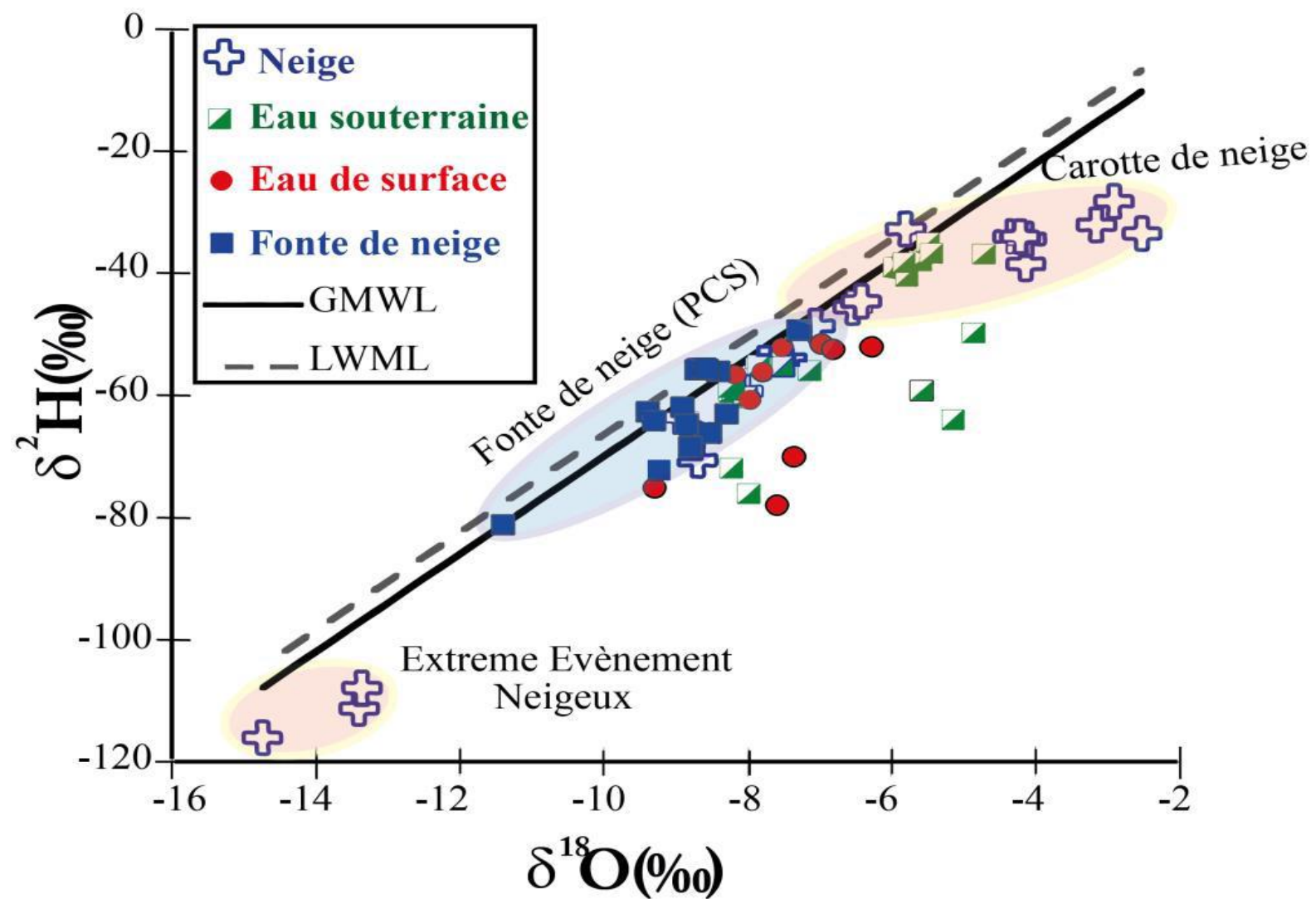
Rheraya la contribution moyenne est de **27 %**

Ourika la contribution moyenne est de **37 %**

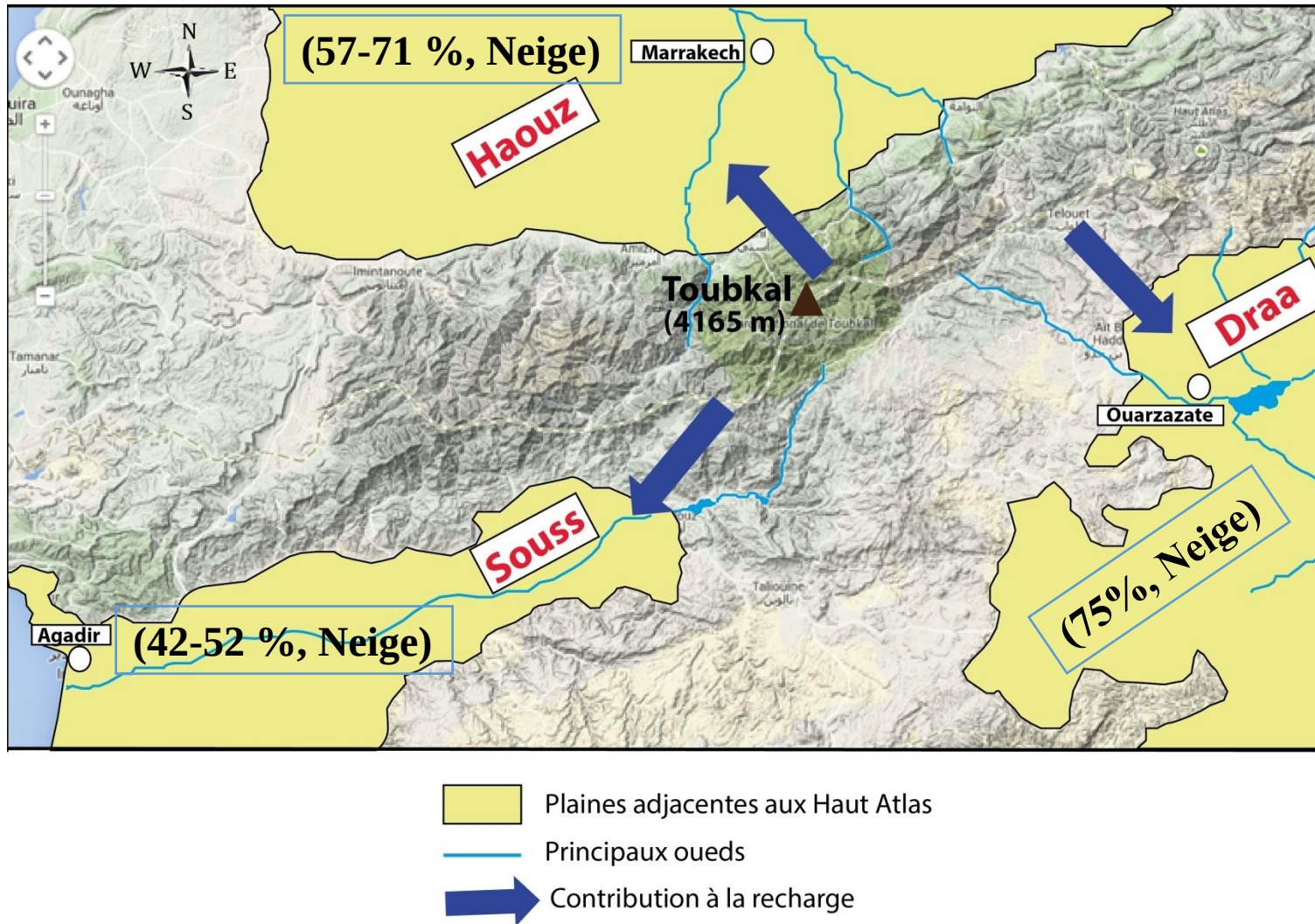


Contribution de la fonte des neiges du Haut Atlas à la recharge des eaux de surface et souterraine

Approche de la géochimie isotopique



Contribution de la fonte des neiges à la recharge des eaux de surface et souterraine : Isotopie



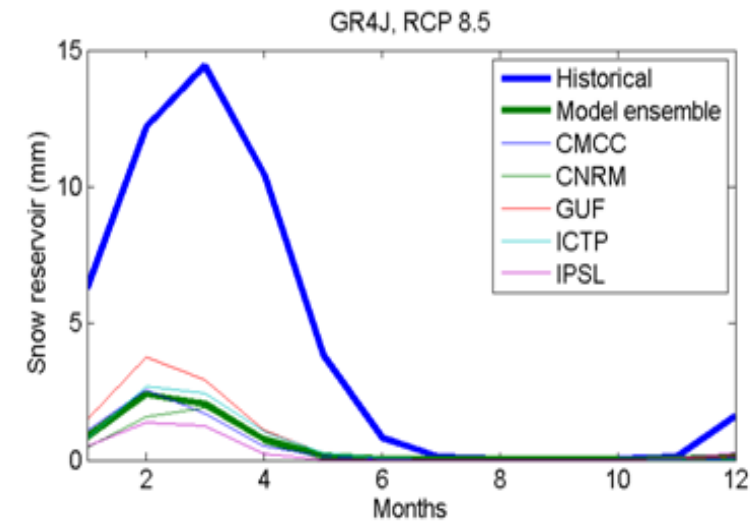
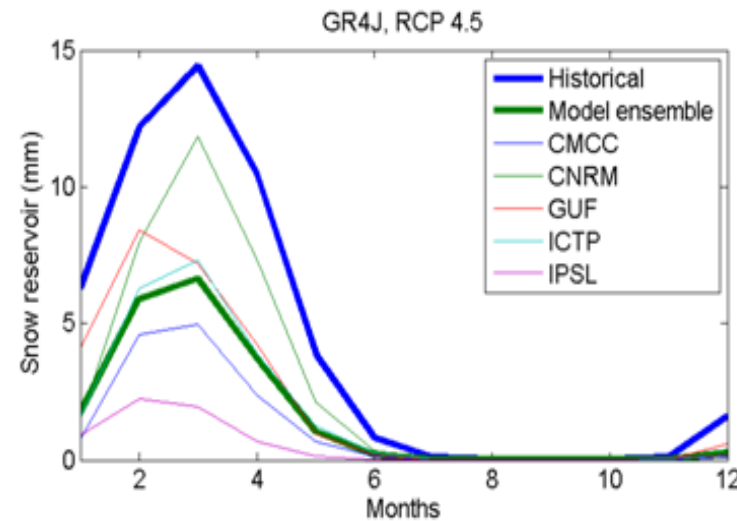
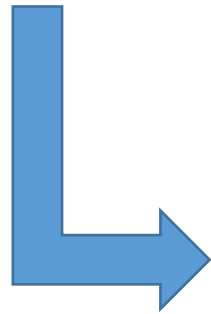
Carte schématique de la contribution du Haut Atlas à la recharge des eaux souterraines des plaines adjacentes (Haouz, Souss, Draa)

Impact des changements climatiques sur l'enneigement du Haut Atlas

Simulation de l'impact de scénarios climatiques sur l'enneigement dans le Haut Atlas

Scénarios climatiques

- Initiative MedCORDEX (2 scénarios RCP4.5 et RCP8.5)
- **Diminution des précipitations** (de -2% à -30% d'ici 2050) au printemps en en automne
- **Augmentation des températures** (entre +1° and +4° en été)



=> Baisse importante du stock de neige

Conclusions

Des résultats substantiels ont été obtenus lors de cette première phase de nos travaux et concernent les points suivants :

- (1) La dynamique spatio-temporelle de l'enneigement par télédétection :
- (2) L'impact de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) sur la surface enneigée des principaux bassins versants :
- (3) La contribution de la fonte des neiges aux débits des rivières de l'Atlas en utilisant différentes approches de modélisation :
- (4) Les résultats de la modélisation et la hauteur de neige observée ont mis en évidence que le manteau neigeux présente une forte variation annuelle. En général, le pic de hauteur de neige dépasse 1 m et, à certaines saisons (par exemple, année hydrologique 2008-2009), il atteint deux mètres dans les régions supérieures (> 3 000 m d'altitude).
- (5) La contribution de la fonte des neiges à la recharge des eaux de surface et souterraines à l'aide des isotopes de la neige :
- (6) Quantification des impacts du changement climatique sur la neige et le ruissellement associé des montagnes de l'Atlas :

Articles :

1. Baba, M.W., Boudhar, A., Gascoin, S., Hanich, L., Marchane, A., Chehbouni, A., 2021. Assessment of MERRA-2 and ERA5 to model the snow water equivalent in the high atlas (1981–2019). *Water* 13, 890. <https://doi.org/10.3390/w13070890>.
2. Baba, M.W., Gascoin, S., Hanich, L., 2018a. Assimilation of Sentinel-2 data into a snowpack model in the High Atlas of Morocco. *Remote Sens.* 10, 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs10121982>.
3. Baba, M.W., Gascoin, S., Jarlan, L., Simonneaux, V., Hanich, L., 2018b. Variations of the snow water equivalent in the ourika catchment (Morocco) over 2000-2018 using downscaled MERRA-2 data. *Water (Switz.)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10091120>.
4. Baba, M.W., Gascoin, S., Kinnard, C., Marchane, A., Hanich, L., 2019. Effect of digital elevation model resolution on the simulation of the snow cover evolution in the high atlas. *Water Resour. Res.* 55, 5360–5378. <https://doi.org/10.1029/2018WR023789>.
5. Bouamri, H., Boudhar, A., Gascoin, S., Kinnard, C., 2018. Performance of temperature and radiation index models for point-scale snow water equivalent (SWE) simulations in the Moroccan High Atlas Mountains. *Hydrol. Sci. J.* 63. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1520391>.
6. Bouamri, H., Kinnard, C., Boudhar, A., Gascoin, S., Hanich, L., Chehbouni, A., 2021. MODIS does not capture the spatial heterogeneity of snow cover induced by solar radiation. *Front. Earth Sci.* 9, 1–19. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.640250>.
7. Boudhar, A., Boulet, G., Hanich, L., Sicart, J.E., Chehbouni, A., 2016. Energy fluxes and melt rate of a seasonal snow cover in the Moroccan High Atlas. *Hydrol. Sci. J.* 61, 931–943. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.965173>.
8. Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., Chehbouni, A., 2011. Spatial distribution of the air temperature in mountainous areas using satellite thermal infrared data. *Comptes Rendus - Geosci.* 343, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.11.004>.
9. Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Chaponniere, A., Maisongrande, P., Boulet, G., Stitou, J., Chehbouni, A., 2007. Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION. *Anal. la Dyn. Des. Surf. enneigées du Haut. Atlas Maroc. `a Part. Des. données SPOTVEGETATION* 18, 278–288. <https://doi.org/10.1684/sec.2007.0100>.
10. Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Jarlan, L., Chaponniere, A., Maisongrande, P., Boulet, G., Chehbouni, A., 2010. Long-term analysis of snow-covered area in the Moroccan High-Atlas through remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.09.008>.
11. Boudhar, A., Hanich, L., Boulet, G., Duchemin, B., Berjamy, B., Chehbouni, A., 2009. Evaluation of the Snowmelt Runoff model in the Moroccan High Atlas Mountains using two snow-cover estimates. *Hydrol. Sci. J.* 54, 1094–1113. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.6.1094>.
12. Boudhar, A., Hanich, L., Marchane, A., Jarlan, L., Chehbouni, A., 2014. Apport des données FORMOSAT2 `a la modélisation du contenu en eau du manteau neigeux du Haut Atlas marocain. *Rev. Fr. Photo T`el`ed`etection* 51–56. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2013.21>.
13. Chaponniere, A., Maisongrande, P., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., Escadafal, R., Elouaddat, S., 2005. A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered areas in the Atlas mountains. *Int. J. Remote Sens.* 26, 2755–2777. <https://doi.org/10.1080/01431160500117758>.
14. Hanich, L., De Solan, B., Duchemin, B., Maisongrande, P., Chaponniere, A., Boulet, G., Chehbouni, G., 2003. Snow cover mapping using SPOT VEGETATION with high resolution data: Application in the Moroccan Atlas mountains, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
15. Hanich, L., Chehbouni, A., Gascoin, S., Boudhar, A., Jarlan, L., Trambly, Y., Boulet, G., Marchane, A., Baba, M. W., Kinnard, C., Simonneaux, V., Fakir, Y., Bouchaou, L., Leblanc, M., Le Page, M., Bouamri, H., Er-Raki, S., & Khabba, S. (2022). Snow hydrology in the Moroccan Atlas Mountains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.eirh.2022.101101>
16. L`opez-Moreno, J.I., Gascoin, S., Herrero, J., Sproles, E.A., Pons, M., Alonso-Gonz`alez, E., Hanich, L., Boudhar, A., Musselman, K.N., Molotch, N.P., Sickman, J., Pomeroy, J., 2017. Different sensitivities of snowpacks to warming in Mediterranean climate mountain areas. *Environ. Res. Lett.* 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa70cb>.
17. Marchane, A., Jarlan, L., Boudhar, A., Trambly, Y., Hanich, L., 2016. Linkages between snow cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco. *Clim. Res.* 69, 229–238. <https://doi.org/10.3354/cr01409>.
18. Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A., Gascoin, S., Tavernier, A., Filali, N., Le Page, M., Hagolle, O., Berjamy, B., 2015. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range. *Remote Sens. Environ.* 160, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.002>.
19. Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A., Marchane, A., 2013. Caract`erisation de l` enneigement sur l` atlas marocain par le capteur MODIS et relation avec le climat (p`eriode 2000-2011) Irrigation assesment for Integrated Water Modelling View project SAT IRR, Satellite for Irrigation scheduling View project CHARACTERIS. *Rev. Fr. Photo T`el`ed`etection*. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2013.18>.
20. Marchane, A., Trambly, Y., Hanich, L., Ruelland, D., Jarlan, L., 2017. Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco). *Hydrol. Sci. J.* 62, 979–995. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1283042>.
21. N`da, A.B., Bouchaou, L., Reichert, B., Hanich, L., Ait Brahim, Y., Chehbouni, A., Beraaouz, E.H., Michelot, J.L., 2016. Isotopic signatures for the assessment of snow water resources in the Moroccan high Atlas mountains: contribution to surface and groundwater recharge. *Environ. Earth Sci.* 75, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5566-9>.

PhD :

1. Boudhar, Abdelghani (2009) -Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux d`éb`its des Oueds du Haut Atlas de Marrakech. Univ. Cadi Ayyad, Fac. des Sci. Tech. Marrakech (co-dir : L. Hnaich et G. Boulet).
2. MARCHANE Ahmed (2015) -Outils spatiaux pour le suivi de la dynamique de la neige sur l`Atlas marocain : changement climatique et ressources en eau. Univ. Cadi Ayyad, Fac. des Sci. Tech. Marrakech (co-dir : L. Hnaich et L. Jarlan).
3. BABA Mohamed Wassim (2018) - Application de la télédétection pour la modélisation du manteau neigeux dans le Haut Atlas. Uni. Paul Sabatier, Toulouse, France (co-dir : S. Gascoin et L. Hnaich).
4. BOUAMRI Hafsa (2021) - Investigating the effect of Radiation and Temperature-index Models to simulate Snowmelt and Snow Water Equivalent from local to basin scale in the Moroccan High Atlas. Uni. Sultan Moulay Slimane, BeniMellal (co-dir : A. Boudhar et C. Kinnard).



Merci pour votre attention