

## IMPORTANCE DE LA RESOLUTION SPATIALE ET TEMPORELLE DES APPROCHES REGIONALES DE MODELISATION DU STRESS HYDRIQUE

MILANO M.<sup>1</sup>, REYNARD E.<sup>1</sup>, RUELLAND D.<sup>2</sup>, SERVAT E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Bâtiment Géopolis, CH-1015 Lausanne, Suisse. [marianne.milano@unil.ch](mailto:marianne.milano@unil.ch), [emmanuel.reynard@unil.ch](mailto:emmanuel.reynard@unil.ch)

<sup>2</sup>CNRS, HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, Place E. Bataillon, CC MSE, 34095 Montpellier Cedex 5, France, [denis.ruelland@um2.fr](mailto:denis.ruelland@um2.fr)

<sup>3</sup>IRD, Institut Montpellierain de l'Eau et de l'Environnement, Université de Montpellier, Place E. Bataillon, CC MSE, 34095 Montpellier Cedex 5, France, [eric.servat@umontpellier.fr](mailto:eric.servat@umontpellier.fr)

**Résumé** – Les pressions accrues sur les ressources en eau liées aux changements climatiques et sociétaux sont reconnues comme des enjeux mondiaux. Une approche régionale de modélisation intégrée, considérant des scénarios hydrologiques et d'usages de l'eau sous contraintes climatiques et anthropiques, a ainsi été développée. Celle-ci a d'abord été appliquée à l'échelle du bassin méditerranéen au pas de temps annuel, puis à l'échelle du canton de Vaud (Suisse) au pas de temps mensuel. Commune aux deux études, cette approche permet d'identifier les grandes tendances hydro-climatiques et d'usages de l'eau d'ici à l'horizon 2050 ainsi que les régions les plus vulnérables au stress hydrique. Ces études soulignent l'importance de pouvoir représenter les variations régionales et saisonnières de la disponibilité des ressources et des demandes en eau. S'appuyant sur les résultats de ces deux travaux, cette communication vise à discuter de la question de la résolution temporelle et spatiale des approches régionales de modélisation intégrée du stress hydrique.

**Mots-clés** : études régionales, stress hydrique, changements climatiques, demande en eau, vulnérabilité.

**Abstract** – *Importance of the spatial and temporal resolution of regional integrated models assessing water stress.* Increasing water tensions due to climatic and societal changes are recognized as world water stakes. A regional integrated modeling approach was developed taking into account evolution in water resources availability and water demands. It was first applied to the Mediterranean basin at a yearly time scale and then to the canton of Vaud (Switzerland) at a monthly time scale. This method identifies hydro-climatic and water use trends by the 2050 horizon as well as the areas most prone to water stress. These studies highlight the importance to represent regional and seasonal variations of water resources availability and water demands. Based on the results of these two assessments, this paper aims to discuss the spatial and temporal resolution of regional integrated models assessing water stress.

**Keywords**: regional studies, water stress, climate changes, water needs, vulnerability.

### Introduction

Les pressions accrues sur les ressources en eau liées aux changements climatiques et anthropiques ainsi que les compétitions entre usages de l'eau sont reconnues comme des enjeux mondiaux. Afin de souligner la nécessité de définir des politiques de mitigation et d'adaptation aux changements climatiques, des approches visant à évaluer le stress hydrique au niveau global ont été mises en œuvre (Alcamo et al., 2007 ; Menzel & Matovelle, 2010). Fondées sur des estimations globales des ressources et des demandes en eau, ces approches ne permettent toutefois pas d'intégrer correctement les impacts des activités humaines sur les hydrosystèmes. C'est pourquoi une approche régionale de modélisation intégrée, considérant des scénarios hydrologiques et d'usages de l'eau sous contraintes climatiques, a été développée (Milano et al., 2012 ; 2015). Celle-ci a été appliquée dans deux contextes différents : le bassin méditerranéen, défini comme un « hot-spot » de crise de l'eau, et le canton de Vaud, territoire situé dans un environnement de montagne où des épisodes locaux de pénurie d'eau émergent. A partir des résultats de ces deux études conduites indépendamment, cette communication vise à discuter de l'importance de la résolution spatiale et temporelle des approches régionales de modélisation du stress hydrique.

## 1. Zones d'étude

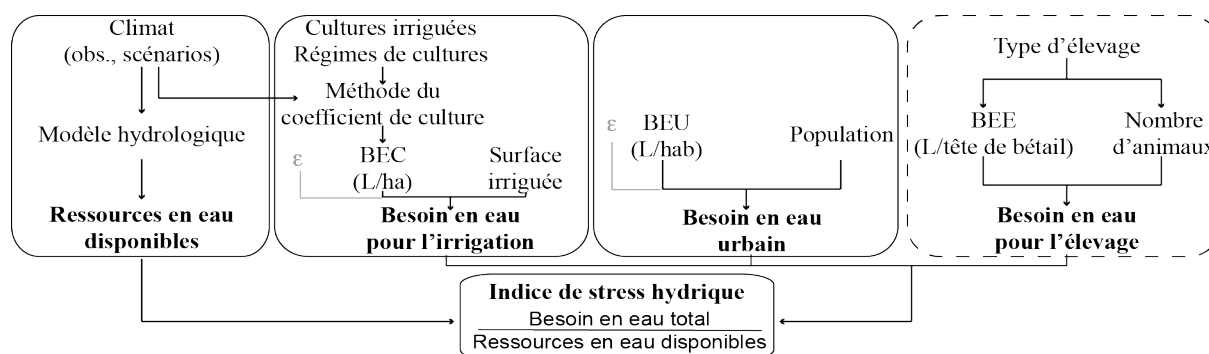
Le bassin méditerranéen a été défini par 73 groupes de bassins versants (Nil exclu) dont les exutoires se situent en mer Méditerranée. Cet espace recouvre une surface de 1,5 millions de km<sup>2</sup>. Son climat est caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs, avec, du Sud au Nord, des températures moyennes comprises entre 18.5 et 12.5°C et des précipitations annuelles moyennes comprises entre 315 et 820 mm/an (période 1980–2000 ; Milano et al., 2012). Cette inégale répartition des précipitations influence la répartition des ressources en eau dont 84.2 % se situent dans les bassins du Nord contre 10 % et 5,8 % dans les bassins versants situés respectivement au sud et à l'est. Le bassin méditerranéen est également marqué par une importante expansion urbaine liée à une population croissante, menaçant les terres agricoles pour lesquelles l'irrigation est de plus en plus utilisée.

Le canton de Vaud, situé en Suisse occidentale, couvre une surface de 2 822 km<sup>2</sup> et s'étend sur les trois régions naturelles de la Suisse (Jura, Plateau, Alpes). Neuf bassins versants dont la superficie est supérieure à 30 km<sup>2</sup> ont été considérés, représentant ainsi 67 % de la superficie du canton. Le climat est doux et humide sur le Plateau, avec une température moyenne de 9°C et des précipitations annuelles moyennes variant entre 800 et 1200 mm/an (période 1985–2005 ; Milano et al., 2015). Dans les massifs jurassiens et alpins, le climat est plus froid et plus humide, avec une température moyenne de 6.5°C et des précipitations annuelles moyennes variant entre 1075 et 1200 mm/an. Le canton est également marqué par des activités anthropiques diversifiées, avec un étalement urbain croissant dans les régions de l'arc lémanique et du lac de Neuchâtel, des plaines agricoles pour lesquelles l'irrigation est de plus en plus mobilisée et des prairies d'altitude favorables à l'élevage.

## 2. Méthode

### 2.1 Méthodologie régionale mise en œuvre

Afin d'évaluer l'évolution des pressions exercées sur les ressources en eau, une modélisation intégrée a été mise en place (Fig. 1). Celle-ci vise tout d'abord à évaluer la disponibilité des ressources en eau puis les besoins en eau des principaux secteurs d'activités pour chacun des bassins versants considérés. Ces variables sont ensuite confrontées au travers d'un indicateur renseignant sur l'état du stress hydrique, c'est-à-dire sur le niveau d'exploitabilité des ressources en eau (Shiklomanov, 1991).



**Figure 1.** Approche méthodologique générale. BEC – besoin en eau unitaire des cultures irriguées ; BEU – besoin en eau unitaire urbain ; BEE – besoin en eau unitaire selon le type d'élevage ;  $\epsilon$  - coefficient d'efficacité hydraulique mobilisé dans le cas méditerranéen ; - - - module mobilisé dans le cas suisse.

Cette méthode a dans un premier temps été appliquée sur une période représentative du climat passé (1971–1990 en Méditerranée, Milano et al. 2012 ; 1985–2005 dans le canton de Vaud, Milano et al., 2015) afin de déterminer l'état actuel des pressions exercées sur les ressources en eau, puis à moyen terme (2041–2060 en Méditerranée ; 2051–2070 dans le canton de

Vaud) afin d'évaluer les impacts des changements climatiques et anthropiques sur l'évolution du stress hydrique.

## **2.2 Estimation des ressources en eau disponibles**

### **2.2.1 Outils mobilisés pour le cas méditerranéen**

Les écoulements mensuels ont été simulés selon le modèle de bilan hydrologique conceptuel Water Balance Model (Yates, 1997) en utilisant une distribution des bassins versants en un maillage régulier au demi-degré carré. Les données de précipitations et températures mensuelles nécessaires en entrée du modèle ont été extraites de la base de donnée mondiale CRU TS 2.1 (Mitchell & Jones, 2005). Les scénarios climatiques futurs ont été générés à partir des sorties de quatre modèles climatiques globaux (GCMs) selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre A2 d'après la méthode des deltas (IPCC, 2007).

### **2.2.2 Outils mobilisés pour le cas vaudois**

Dans le cadre du canton de Vaud, le modèle semi-distribué PREVAH (Viviroli et al., 2007) a été appliqué au pas de temps journalier pour une meilleure représentation des processus hydrologiques de montagne. Les données climatiques passées ont été extraites de la base de données climatique suisse (MeteoSuisse, 2008) puis interpolées selon la méthode de pondération inverse à la distance avec élimination des tendances (Viviroli et al., 2007). Les changements climatiques futurs proviennent de scénarios climatiques suisses construits avec la méthode des deltas à partir de dix modèles climatiques régionaux sous contrainte du scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B (Bosshard et al., 2011; CH2011, 2011).

## **2.3 Estimation des besoins en eau**

Les besoins en eau pour l'irrigation et les besoins en eau domestiques ont été considérés dans les deux études. Ils prennent en compte l'approvisionnement en eau des secteurs urbains et ruraux, ainsi que des industries raccordées aux réseaux d'eau potable. Dans les bassins versants méditerranéens, ces valeurs ont été évaluées au pas de temps annuel, faute de données plus fines, puis corrigées d'un coefficient d'efficacité hydraulique (PNUE-PAM, 2006) dans le but d'obtenir des estimations de prélèvements en eau. Dans l'étude menée sur le canton de Vaud, ils ont été évalués au pas de temps mensuel et les besoins en eau pour l'élevage ont également pu être estimés. Concernant les projections futures, les impacts des changements climatiques sur les besoins en eau des plantes ont été évalués au moyen du modèle CROPWAT (Allen et al., 1998), tandis qu'un scénario d'extrapolation tendanciel de la croissance démographique et de l'évolution des cheptels a été utilisé pour estimer les besoins en eau domestiques et les besoins en eau pour l'élevage.

## **3. Résultats**

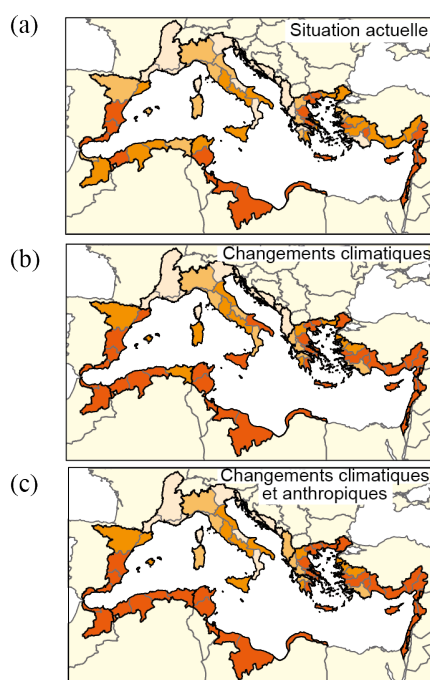
### **3.1 Evolution du stress hydrique en Méditerranée**

Le bassin méditerranéen est actuellement en situation de stress hydrique important (Fig. 2.1a). Les régions les plus vulnérables concernent le Sud de l'Espagne, la Tunisie, la Libye et le Sud-Est de la Méditerranée. Ces régions se caractérisent par des besoins en eau élevés et des ressources en eau disponibles faibles. Les bassins du Nord de l'Italie, de l'Ouest de la Grèce et de l'Ebre en Espagne sont en situation de stress hydrique modéré tandis que les bassins méditerranéens en France et dans les Balkans sont en situation de confort.

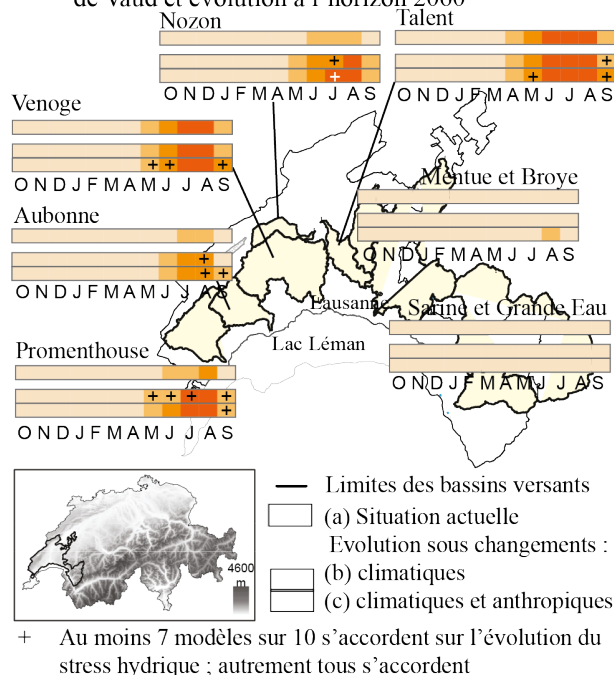
A moyen terme, les températures pourraient augmenter de 1,5 à 2,5°C et les précipitations diminuer de 5 à 20 % sur l'ensemble du bassin méditerranéen, provoquant des épisodes de sécheresse plus longs et plus intenses. Les plus importantes variations devraient être

observées en Espagne, au Maroc, en Algérie et au Proche-Orient, où une diminution de 20–40 % des précipitations est projetée. Ces variations climatiques devraient induire une diminution de 15–35 % des ressources en eau sur la rive Nord et de plus de moitié sur les autres bassins. Ces variations hydro-climatiques devraient provoquer une détérioration du stress hydrique de modéré à sévère sur la rive Nord (Fig. 2.1b). Seuls les bassins méditerranéens en France et dans les Balkans devraient maintenir une situation de confort. Sur l'ensemble des bassins versants des rives Sud et Est de la Méditerranée, une situation de pénurie devrait apparaître. En considérant également les projections anthropiques (croissance démographique, accroissement des surfaces irriguées), 70 % du bassin méditerranéen pourrait se situer dans un contexte de stress hydrique élevé, voire de pénurie (Fig. 2.1c).

2.1 Situation actuelle du stress hydrique dans le bassin méditerranéen et évolution à l'horizon 2050



2.2 Situation actuelle du stress hydrique dans le canton de Vaud et évolution à l'horizon 2060



**Figure 2.** Situation actuelle du stress hydrique dans le bassin méditerranéen et dans le canton de Vaud (a) et évolution à moyen terme sous contraintes climatiques (b) et sous l'effet conjugué des changements climatiques et anthropiques (c).

**3.2 Evolution du stress hydrique dans le canton de Vaud**

Dans le canton de Vaud, un net contraste est visible entre l'Est et l'Ouest du territoire (Fig. 2.2a). Les bassins situés à l'Est sont actuellement en situation de confort et cette situation devrait se maintenir à moyen terme. En effet, ces bassins bénéficient d'eau suffisamment abondante pour satisfaire les besoins en eau grâce aux précipitations élevées et la fonte des neiges au printemps et en été. L'Ouest du canton, quant à lui, subit actuellement une situation de stress hydrique modéré pendant la saison estivale, voire même de pénurie dans les bassins de la Venoge et du Talent. Ceci est lié à des besoins urbains et d'irrigation élevés, représentant plus de 40 % des besoins annuels, associés à un régime hydrologique pluvial.

A moyen terme, les températures pourraient augmenter de 2–3°C sur l'année et de 3–4°C en été. Dans les régions alpines et du Plateau, les volumes précipités devraient peu évoluer mais la proportion de précipitations sous forme liquide devrait augmenter par rapport aux

précipitations sous forme solide. Dans la région lémanique et jurassienne, les précipitations devraient augmenter de 10–30 %, avec une proportion de pluie plus importante que de neige. Les écoulements devraient donc augmenter en automne et en hiver (15–30 %) et diminuer en été (25–35 %). La fonte des neiges risque de n'être plus suffisante pour soutenir les basses eaux, entraînant des étiages plus longs et plus sévères. Les bassins de la région lémanique et jurassienne devraient donc subir un stress hydrique modéré dès le mois de mai et un stress important les mois d'été (Fig. 2.2b). En considérant également les projections anthropiques, des situations de stress hydrique important devraient apparaître en juin et septembre et des situations de pénurie en juillet et août (Fig. 2.2c).

#### 4. Discussion

Cette synthèse offre une vision régionale de la vulnérabilité des ressources en eau face aux changements climatiques et anthropiques. La hausse des températures et l'évolution saisonnière des précipitations devraient diminuer ou modifier la distribution saisonnière des ressources en eau disponibles et provoquer des étiages plus longs et plus sévères. Combinées à des pressions anthropiques croissantes, les situations de stress hydrique sévère voire de pénurie devraient s'accroître dans l'ensemble du bassin méditerranéen mais également durant la période estivale dans les régions tempérées de moyenne montagne telles que le canton de Vaud. Appliquée dans deux régions géographiques différentes, l'approche développée montre sa capacité à être facilement adaptée et transférée dans différents contextes. Néanmoins, au-delà des limites traditionnelles des approches intégrées (équifinalité des paramètres hydrologiques, estimation statistique des besoins en eau, influence des stratégies économiques et politiques sur les usages), ces travaux soulignent l'importance du choix de l'espace géographique et du pas de temps étudiés.

Par rapport aux études globales, les approches régionales permettent d'intégrer des spécificités et enjeux régionaux, tels que des stratégies d'adaptation. La capacité de ces dernières à réduire les tensions d'usages de l'eau peut ainsi être évaluée (Milano et al., 2012). Les approches régionales ont ainsi l'avantage de fournir aux décideurs un champ d'action plus précis. *A contrario*, elles ne permettent pas de considérer explicitement les particularités locales spécifiques à un bassin versant (par exemple les stocks d'eau souterrains ou artificiels, types d'usages locaux et priorités d'allocation) de part la diversité des territoires étudiés. Ceci est aussi lié à une volonté de proposer une méthode commune à un ensemble de bassins versants, favorisant ainsi les comparaisons.

La disponibilité de données homogènes sur l'ensemble des territoires complexifie également une approche dynamique et fine du stress hydrique dans le temps. A l'échelle du bassin méditerranéen, la vulnérabilité des territoires au stress hydrique n'a pu être évaluée qu'au pas de temps annuel. Les espaces plus petits, tels que le canton de Vaud, permettent d'accéder à davantage de données à un pas de temps plus fin, favorisant une analyse saisonnière. Par ailleurs, les variations hydro-climatiques futures sont évaluées sur une moyenne de 20 ans, masquant la variabilité interannuelle. Afin de pouvoir l'intégrer dans la démarche ou évaluer la probabilité d'occurrence d'épisode de sécheresse à moyen terme, des scénarios climatiques s'appuyant sur d'autres techniques statistiques de désagrégation spatiale des GCMs devraient être considérés (voir par ex. van Pelt et al., 2012). Ceci permettrait aussi d'évaluer l'évolution des besoins en eau, notamment pour l'irrigation, selon si l'année est sèche ou humide. La méthode des deltas, mobilisée dans ces travaux, extrait les tendances des modèles climatiques et les applique sur des chroniques observées de températures et précipitations. Cette méthode est considérée comme adéquate pour étudier l'impact des changements climatiques sur la variabilité saisonnière des ressources et besoins en eau.

## Conclusion

Les approches régionales permettent (i) de définir les grandes tendances évolutives du stress hydrique, (ii) d'identifier les régions les plus vulnérables et (iii) d'en déterminer les principales causes. Elles encouragent par la suite à se concentrer sur les bassins identifiés comme les plus sensibles. Les approches plus locales permettent en effet une représentation plus fine de la complexité spatiale des hydrosystèmes et de leur fonctionnement hydraulique. Les espaces institutionnels de gestion, qui ne correspondent pas toujours aux limites du bassin versant, ainsi que les règles de gestion locales parfois complexes sont également plus faciles à intégrer à ces échelles. Enfin, c'est au niveau local que les besoins en eau sont évalués, favorisant une meilleure appréhension de leur dynamique spatiale et temporelle ainsi que la détermination des facteurs les influençant. Dès lors, les démarches locales offrent une vision complémentaire et contribuent davantage à l'élaboration de plans d'actions locaux.

## Bibliographie

- Alcamo J., Florke M., Marker M., 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol. Sci. J.*, **52**, 247-275.
- Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper*, **56**, 300 p.
- Bosshard T., Kotlarski T., Ewen T., Schär C., 2011. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 2777-2788.
- CH2011, 2011. *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Zurich, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, 88 p.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: the physical science basis. In Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H. (éds). *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press, 1008 p.
- Menzel L., Matovelle A., 2010. Current state and future development of blue water availability and blue water demand: a view at seven case studies. *J. Hydrol.*, **384**, 245-263.
- MeteoSuisse, 2008. *Séries chronologiques de variables météorologiques*. Zurich, Office fédéral de météorologie et de climatologie. Disponible sur : [www.meteoswiss.admin.ch](http://www.meteoswiss.admin.ch) (consulté en janvier 2015).
- Milano M., Ruelland D., Fernandez S., Dezetter A., Fabre J., Servat, E., 2012. Facing climatic and anthropogenic changes in the Mediterranean region: What will be the medium-term impact on water stress? *C.R. Geoscience*, **344**, 432-440.
- Milano M., Reynard E., Köplin N., Weingartner R., 2015. Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress. *Sci. Total Environ.*, **536**, 12-24.
- Mitchell T., Jones, P., 2005. An improved method of constructing database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693-712.
- PNUE-PAM, 2006. *Stratégie méditerranéenne pour le développement durable*. Athènes, PNUE-PAM, 64 p.
- Shiklomanov I., 1991. The World's water resources. In UNESCO (éd.). *Proc. Int. Symp. to commemorate 25 Years of the IHP*. Paris, UNESCO/IHP, 93-126.
- van Pelt S., Beersma J., Buisants T., van der Hurk B., Kabat P., 2012. Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 4517-4530.
- Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., 2007. *The hydrological modelling system PREVAH*. University of Bern, Institute of Geography, Geographica Bernensia P40.
- Yates D., 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. Hydrol.*, **201**, 289-310.