

*Alternanthera philoxeroides* et *Eichhornia crassipes*, deux espèces  
aquatiques potentiellement invasives en région  
PACA

État des lieux des populations et modélisation de leur  
niche bioclimatique potentielle actuelle et future

présenté par GUIGNARD Nicolas, LADENT Émilie, LE GUEN Lucie et MARIANI Vincent



Responsables pédagogiques : CLARET Cécile et GROS Raphaël

Encadrants : GAIME-PERRAUD Isabelle et LERICHE Agathe

**Master 1ère année 2014 – 2015**

**Spécialité : Sciences de la Biodiversité et Ecologie (SBE)**

***Alternanthera philoxeroides* et *Eichhornia crassipes*, deux  
espèces aquatiques potentiellement invasives en région**

**PACA**

Etat des lieux des populations et modélisation de leur  
niche bioclimatique potentielle actuelle et future

présenté par GUIGNARD Nicolas, LADENT Émilie, LE GUEN Lucie et MARIANI Vincent

**Responsables pédagogiques : CLARET Cécile et GROS Raphaël**

**Encadrants : GAIME-PERRAUD Isabelle et LERICHE Agathe**

## Charte anti-plagiat

Nous soussignés, Émilie LADENT, Lucie LE GUEN, Nicolas GUIGNARD et Vincent MARIANI étudiants en première année de master SET spécialité SBE à Aix-Marseille Université,

Attestons sur l'honneur que le présent mémoire a été écrit de nos mains, que ce travail est personnel et que toutes les sources d'informations externes et les citations d'auteurs ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur (Nom de l'auteur, nom de l'article, éditeur, lieu d'édition, année, page).

Nous certifions par ailleurs que nous n'avons ni contrefait, ni falsifié, ni copié l'œuvre d'autrui afin de la faire passer pour nôtre.

Fait à Marseille, le 29/05/2015

Signatures :



## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier nos tutrices Agathe Leriche et Isabelle Gaime-Perraud pour leur encadrement et leurs précieux conseils pour ce projet.

Nous remercions également le Conservatoire Botanique National Méditerranéen (CBNmed), pour leur collaboration tout au long du projet et sur le terrain. Ainsi nous remercions tout particulièrement Henry Michaud, Lætitia Farsac, Élise Krebs, Éléonore Terrin et Mathias Pirès.

De plus nous remercions Raphaël Gros pour l'encadrement et les informations qu'il a pu nous apporter.

De même que Sevastianos Roussos de s'être occupé des financements nécessaires à ce projet.

Nous remercions également Nicolas Kaldonski pour le prêt de matériel, sans lequel les relevés de terrain n'auraient pu être effectués.

Nous remercions également Laurence Affre pour son aide précieuse à l'élaboration du protocole de terrain.

Enfin nous remercions tous les organismes qui nous ont répondu sur les sites de présence des espèces.

Et pour finir, nous remercions tous nos collègues de SBE pour leur soutien tout au long de ce stage.

# SOMMAIRE

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Matériel et méthodes .....</b>	<b>2</b>
2.1. Modèles biologiques .....	2
2.2. Vérification des présences de populations .....	4
2.3. Suivi et impact de population d' <i>Alternanthera philoxeroides</i> .....	5
2.3.a. Acquisition des données .....	5
2.3.b. Analyses statistiques .....	6
2.4. Modélisation des niches bioclimatiques potentielles .....	6
<b>3. Résultats .....</b>	<b>9</b>
3.1. Vérification des présences de populations .....	9
3.2. Suivi et impact de population d' <i>Alternanthera philoxeroides</i> .....	9
3.3. Modélisation des niches bioclimatiques potentielles .....	11
3.3.a. <i>Alternanthera philoxeroides</i> .....	11
3.3.b. <i>Eichhornia crassipes</i> .....	11
<b>4. Discussion .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>6. Références bibliographiques .....</b>	<b>17</b>
Glossaire .....	21

## Liste des Figures

**Figure 1:** Schéma de la stratégie d'échantillonnage appliquée sur la station d'*Alternanthera philoxeroides* de l'Ouvèze (Sorgues, 84) afin d'étudier les caractéristiques de la population (paramètres physico-chimiques, morphologiques, richesse et diversité spécifique) ..... 5

**Figure 2 :** Schéma d'une placette d'échantillonnage de la population d'*Alternanthera philoxeroides* de l'Ouvèze (Sorgues, 84) afin d'en relever les caractéristiques physico-chimiques, morphologiques et de richesse et diversité spécifique ..... 6

**Figure 3 :** Niche bioclimatique potentielle actuelle (a) et en 2070s (b) d'*A.philoxeroides* en région PACA.

Cette carte est issue du modèle linear/quadratic/product sous MaxEnt. Sept variables bioclimatiques ont été sélectionnées avec une résolution de 10x10km: « Température moyenne du trimestre le plus humide » (BIO 8), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO 9), « Température moyenne du trimestre le plus chaud » (BIO10), « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO 11), « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO 16), « Précipitations du trimestre le plus sec » (BIO 17), « Précipitations du trimestre le plus chaud » (BIO 18). ..... 10

**Figure 4 :** Niche bioclimatique potentielle actuelle (a) et en 2070s (b) pour *E. crassipes* en région PACA.

Cette carte est issue du modèle linear/quadratic sous MaxEnt. Les variables bioclimatiques sélectionnées, de résolution 10x10km, correspondent aux 3 premiers axes de l'ACP. Les valeurs de PC1 correspondent aux variables bioclimatiques : « Température annuelle moyenne » (BIO1), « Température minimale du mois le plus froid » (BIO6), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO9) et « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO11). Les valeurs de PC2 concordent avec « Précipitations du mois le plus sec » (BIO14) et « l'Écart de température journalier » (Moyenne mensuelle (Max temp – Min temp)) (BIO2). Les valeurs de PC3 correspondent à la « saisonnalité des températures » (BIO4) et aux « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO16)..... 12

## **Annexes**

*Annexe 1 : Relevés de terrain sur la population connue de A.philoxeroides (Site d'étude, fiche de relevés et références des sondes utilisées) ..... I*

*Annexe 2 : Niches bioclimatiques potentielles mondiales actuelles (a) et en 2070s (b) pour A.philoxeroides ..... III*

*Annexe 3 : Résultats des contributions de chaque variable bioclimatique à la modélisation des niches bioclimatiques potentielles de A. philoxeroides (a) et de E. crassipes (b) ..... IV*

*Annexe 4 : Résultats des Analyses en Composantes Principales réalisées sur les variables bioclimatiques .....V*

*Annexe 5 : Niches bioclimatiques potentielles mondiales actuelles (a) et en 2070s (b) pour E.crassipes ..... VI*

## 1. Introduction

Le changement climatique et les invasions biologiques sont deux facteurs importants affectant la biodiversité et les services écosystémiques (Walther *et al.*, 2009). Les plantes invasives sont connues comme étant l'une des menaces les plus importantes pour la biodiversité des espèces indigènes (Kolar & Lodge, 2001). Ces plantes prolifèrent, se dispersent et persistent dans un environnement qui n'est à l'origine pas le leur, et ceci au détriment de l'écosystème préexistant (Mack *et al.*, 2000). En effet, les espèces invasives sont très compétitives et peuvent entraîner une diminution de la richesse spécifique et/ou une diminution de l'abondance de certaines espèces. Ainsi, elles modifient la structure, la composition et la qualité des communautés végétales indigènes (D'Antonio & Vitousek, 1992), perturbant alors le fonctionnement de l'écosystème. De plus, les cycles biogéochimiques, les cycles hydrologiques, et les régimes de perturbations peuvent également être altérés par l'installation de ces espèces. La problématique des espèces invasives est d'autant plus préoccupante dans un contexte de réchauffement climatique. En effet, des preuves anecdotiques suggèrent que les changements climatiques ne sont pas susceptibles de diminuer sensiblement l'impact des espèces envahissantes ; beaucoup d'entre elles s'étendent déjà sur une large gamme de conditions environnementales (Hellmann *et al.*, 2008). *Alternanthera philoxeroides* et *Eichhornia crassipes*, espèces aquatiques natives d'Amérique du Sud, sont considérées comme invasives (Chatterjee & Dewanji, 2012; Téllez *et al.*, 2008). Dans les milieux envahis, les principales problématiques liées à la présence de ces espèces sont des risques sanitaires (création d'habitats pour les moustiques), des pertes économiques (par l'obstruction des voies navigables, pour la pêche et pour leur éradication), ainsi qu'un fort impact sur la biodiversité (exclusion par compétition) (Van Oosterhout, 2007 ; Julien, 2008). Ce caractère invasif s'explique par les traits fonctionnels liés à leur reproduction. En effet, ces deux espèces ont principalement une multiplication asexuée, les nouveaux plants sont produits à partir de l'élongation des stolons (Center *et al.*, 2002), ou à partir de fragments se détachant du pied mère. Les deux espèces ont une croissance très rapide, la population étant doublée en 6 à 18 jours pour *E.crassipes* (Téllez *et al.*, 2008) et pouvant s'étendre de 4,3m par an pour *A.philoxeroides* (Sainty *et al.*, 1997). Si sur les sites d'introduction, *A.philoxeroides* n'est pas capable de produire des graines viables, *E.crassipes* peut quant à elle produire jusqu'à 300 graines par fleur, pouvant se maintenir, en moyenne, 6 ans (jusqu'à 20 ans) dans les sédiments (Gopal, 1987). Cette multiplication asexuée pose des problèmes

majeurs pour l'éradication de ces espèces. La présence de ces deux espèces est avérée en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA). En effet, elles sont observées depuis 2013 pour *A.philoxeroides* et 2004 pour *E.crassipes*. Par leurs caractéristiques écologiques et leurs enjeux (sanitaires, économiques et écologiques), ces espèces présentent un risque invasif potentiel en région PACA (*A.philoxeroides* : **33/38** ; *E.crassipes* : **30/38** (d'après l'analyse de Weber & Gut, 2004, avec un seuil invasif = 28/38). Ces deux espèces sont donc intégrées dans la stratégie régionale relative aux espèces végétales exotiques envahissantes menée par le Conservatoire Botanique National Méditerranéen (OEC, 2010 <http://www.oec.fr/modules.php?name=News&file=print&sid=201>; <http://www.cbnmed.fr>), chargé de la protection et de l'inventaire des espèces végétales de la région. L'éradication totale d'*A.philoxeroides* est aujourd'hui envisagée en région PACA, c'est pourquoi notre étude a pour premier objectif la définition et la mise en place d'un protocole permettant le suivi diachronique de l'étendue de l'unique population connue d'*A.philoxeroides* en PACA. Le protocole doit également permettre d'établir l'existence d'un impact potentiel de la présence de cette espèce invasive sur la communauté végétale indigène. De plus, ce même protocole permettra d'évaluer si des différences existent au sein même de la population selon le milieu colonisé (paramètres physico-chimiques, morphologie de l'espèce, physionomie du milieu). L'étude se focalise sur *A.philoxeroides*, celle-ci possédant une population stable depuis deux ans en PACA, mais a également pour objectif d'effectuer un état des lieux de la présence d'*E.crassipes* dans la région. Le second objectif de l'étude est d'évaluer le risque d'invasion actuel et futur (2070s) des deux espèces considérées en région PACA, par l'utilisation de la modélisation de la niche bioclimatique potentielle.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Modèles biologiques

*Alternanthera philoxeroides*, ou « herbe à alligator », est une plante stolonifère amphibie. Cette espèce est originaire du sud du Brésil (Vogt *et al.* 1979). Elle se retrouve à travers une vaste gamme de latitudes en Amérique du Sud (18-39°S) (Pan *et al.*, 2013), indiquant ainsi sa capacité à proliférer sous diverses régions phytogéographiques (Chatterjee & Dewanji, 2012). Elle a ainsi envahi de nombreuses aires à travers le monde (Julien *et al.*, 1995), y compris les zones riveraines (Pan *et al.*, 2006) et les terres agricoles (Spencer & Coulson, 1976). En France, l'espèce est présente sur la façade Atlantique et à l'ouest de la

région PACA. En milieu aquatique, elle est enracinée dans le substrat et les feuilles forment des tapis denses à la surface de l'eau (Vogt *et al.*, 1979). Les tiges sont grandes, 20 à 60 cm, et creuses pour permettre une bonne flottabilité. *A contrario*, en milieu terrestre, les tiges sont plus petites, plus solides et légèrement creuses (Julien *et al.*, 1992). Les feuilles, opposées et sessiles, de couleur verte sombre brillante sont ovales elliptiques. Les fleurs papyracées sont groupées en petits glomérules blancs argentés. Un pic de croissance a lieu en été (Sainty *et al.*, 1997) avec une floraison au milieu de saison, produisant par la suite une seule graine dans le fruit (non-viable dans les sites non-natifs). *A.philoxeroides* se reproduit donc principalement par multiplication végétative à stolons et racines (Julien *et al.*, 1995). La capacité de cette plante à croître dans les milieux aquatiques ainsi que les habitats terrestres lui permet de persister dans des régions qui alternent périodes de sécheresse et saisons humides (Masterson, 2007, [http://www.sms.si.edu/irlspec/alternanthera\\_philoxeroides.htm](http://www.sms.si.edu/irlspec/alternanthera_philoxeroides.htm)). Lors de sécheresses, en milieu terrestre, *A.philoxeroides* alloue plus de la moitié de la biomasse totale à ses racines, qui servent à produire *in fine* de nouveaux ramets dans des environnements favorables (Genga *et al.*, 2006). En effet, dans les régions chaudes à fortes précipitations, le risque invasif reste peu important. De même, une sénescence peut être observée en hiver, due à la diminution de température (ceci a été observé en Nouvelle Zélande) (Liu *et al.*, 2004). Dans les habitats terrestres avec un hiver froid, la plupart des tiges et des feuilles sont tuées par le gel (Zhang *et al.*, 2004). Cependant, les racines pivotantes épaisses stockant beaucoup de ressources peuvent échapper à des blessures dues au gel et constituer un pool de ressources primaires prenant en charge la régénération de la population au printemps suivant. De plus, au-delà d'une salinité de 17,5 g/L, l'espèce ne peut se maintenir. Cependant, en dessous de ce seuil, elle tolère une exposition prolongée à la salinité (Jorge *et al.*, 1984). Ainsi, les facteurs environnementaux comme la pente, l'accumulation de débit, la température annuelle moyenne, les précipitations moyennes annuelles influencent fortement la taille de l'aire de répartition potentielle d' *A.philoxeroides*, tandis que les paramètres comme le rayonnement solaire et l'altitude ont peu d'impact (LiLi *et al.*, 2008).

***Eichhornia crassipes*** (C. Mart.) Solms (1883), ou « jacinthe d'eau », est une plante aquatique clonale originaire du bassin amazonien (Barret & Forno, 1982). Elle est actuellement présente en zones tropicales et subtropicales entre 39°N et 39°S (Téllez *et al.*, 2008) ainsi que dans les zones tempérées. Plusieurs attributs de *E.crassipes* ont contribué à son succès comme un envahisseur mondial des habitats aquatiques : une capacité prolifique pour la

multiplication par la reproduction clonale, la grande mobilité de sa forme de vie flottante et des taux de croissance très élevés dans des conditions environnementales appropriées (Sculthorpe, 1967). Ces caractéristiques donnent lieu à de grandes quantités de biomasse qui couvrent la surface de l'eau, interférant souvent avec l'utilisation et la gestion des ressources en eau (Téllez *et al.*, 2008). En France, elle est principalement présente en Corse (OEC, 2010), et ponctuellement en région PACA. *E. crassipes* est une plante macrophyte flottante affichant deux morphologies différentes avec des intermédiaires, dépendantes des conditions dans lesquelles elle se développe. Dans les peuplements denses, les pétioles sont allongés (jusqu'à 1 m de longueur dans les eaux riches en nutriments dépourvues d'herbivores) (Coetzee *et al.*, 2009). La morphologie des racines est très variable et leur plasticité morphologique est liée aux éléments nutritifs, en particulier au phosphore (P) disponible dans l'eau (Xie & Yu, 2003). *E. crassipes* possède 6-10 feuilles glabres, épaisses, disposées en rosettes. Celles-ci sont reliées à la tige grâce à un pétiole de nature spongieux, la rendant insubmersible. Au sommet de la tige, 8 à 15 fleurs comportant 6 pétales violacés se développent. Les fleurs produisent de grandes quantités de graines qui peuvent rester viables pendant 20 ans dans les sédiments (Gopal, 1987). L'espèce se développe dans des eaux stagnantes ou à faible courant, et dans une vaste gamme de températures, allant de 1°C à 40°C, avec un optimum de croissance de 25-27.5°C. Celle-ci est stoppée si la température de l'eau chute en dessous de 10°C ou dépasse 40°C (François, 1969). Une exposition prolongée à des températures inférieures à 5°C peut être létale, ce qui limite la distribution de *E. crassipes* en hautes latitudes (Gopal, 1987). La salinité potentielle du milieu est un facteur limitant pour son développement ; au delà de 6,0 - 8,0 g/L, il est même impossible. La salinité limite généralement la mise en place de l'espèce dans les zones côtières et dans les estuaires (Mangas-Ramirez & Elias-Gutierrez, 2004). *E. crassipes* peut cependant tolérer les fluctuations de nombreux paramètres : niveau de l'eau, vitesse d'écoulement, disponibilité des nutriments, pH, températures et substances toxiques (Gopal, 1987).

## **2.2. Vérification de la présence des populations**

Les deux espèces ont été signalées en région PACA, principalement dans les départements du Vaucluse (84), des Bouches-du-Rhône (13) et du Var (83). Étant donné la durée de l'étude, un inventaire exhaustif n'a pas pu être établi. La stratégie a donc été de rechercher les points d'occurrences signalés sur la base de données SILENE. Puis, des organismes publics et privés de gestion d'espaces naturels ont été contactés afin de

déterminer si d'autres populations avaient été détectées (ONCFS, ONEMA, CEN PACA, etc.\*). Après avoir récolté ces données, des prospections ont été réalisées sur chaque point d'occurrence signalé (passé et actuel) afin de vérifier la présence ou non de populations. En effet, des points ont été notés quelques années auparavant, sans l'être de nouveau les années suivantes. A l'issue de cette prospection, une mise à jour des occurrences actuelles des deux espèces a pu être réalisée.

## 2.3. Suivi et impact de population d'*Alternanthera philoxeroides*

### 2.3.a. Acquisition des données

La population étudiée sur l'Ouvèze (Annexe 1(a)) s'étend sur environ 210 m. Elle est l'unique population répertoriée aujourd'hui en région PACA. L'espèce est installée en zone aménagée, sur la berge Ouest du cours d'eau, en zone ouverte.

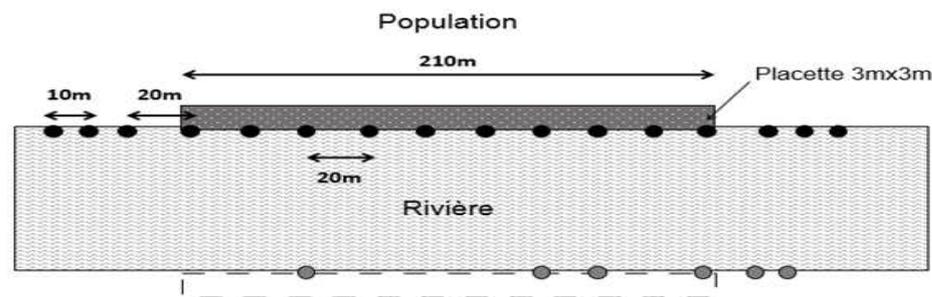
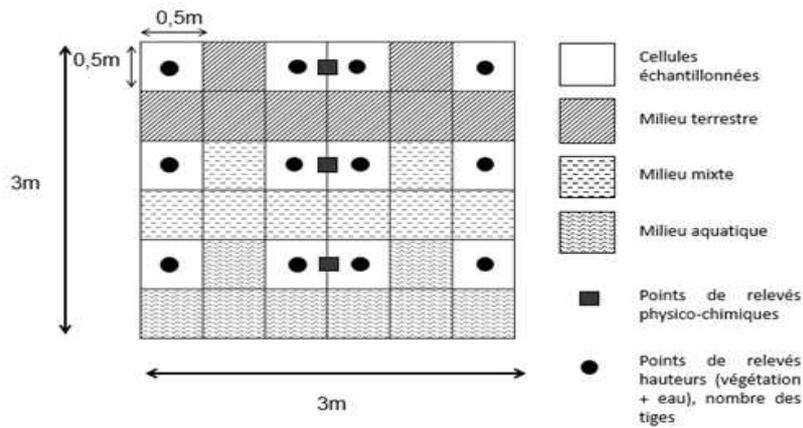


Figure 1: Schéma de la stratégie d'échantillonnage appliquée sur la station d'*Alternanthera philoxeroides* de l'Ouvèze (Sorgues, 84) afin d'étudier les caractéristiques de la population (paramètres physico-chimiques, morphologiques, richesse et diversité spécifique).

Vingt-deux placettes de 3x3m ont été disposées le long des berges (Figure 1) à raison de 10 placettes tous les 20m dans la population continue (P), 3 placettes tous les 10m de part et d'autre de la population, considérées comme les témoins (T) (6 au total, 3 dans chaque zone d'extension), la première à 20m de la fin de la population. Six placettes de l'écosystème de référence (ER) ont été placées selon les possibilités liées au terrain en face des autres placettes (4 en face de la population continue, 2 en face de la zone d'extension)

Dans l'ensemble des placettes ont été relevées des données relatives aux paramètres physiques et biologiques (espèces végétales) du milieu (Annexe 1(b)) : pente de la berge, exposition, courant, présence/absence d'*A.philoxeroides*, richesse et diversité spécifique ainsi que le taux de recouvrement de chacune des espèces relevées. Dans chaque placette, la hauteur de végétation a été relevée en 12 points (4 points en milieu terrestre, 4 en milieu aquatique et 4 en milieu mixte ; Figure 2).

\*Voir liste complète au glossaire page 21



Par placette ont également été réalisés, à l'aide de sondes (Annexe 1(c)), trois relevés (un par milieu) de température et de pH de l'eau, de conductivité, d'O<sub>2</sub> dissous.

Dans les placettes situées au sein de la population continue, le nombre de tiges érigées d'*A.philoxeroides* dans 12 cellules de 0,5x0,5m centrées sur les points de relevés de hauteur de végétation a été déterminé (Figure 2).

### 2.3.b. Analyses statistiques

Un test de Shapiro a été réalisé sous R (R Core Team (2014), Langage et environnement pour statistiques informatiques, <http://www.R-project.org/>), afin de déterminer si les données suivent une loi normale. Si cela est le cas, un test de Student est effectué. Sinon, un test de Kruskal-Wallis (pour plus de deux échantillons appariés) ou de Wilcoxon (pour deux échantillons appariés) sont menés. Tous les tests ont été réalisés avec un risque d'erreur ( $\alpha = 0,05$ ). Un test de Student a été réalisé pour étudier l'impact du recouvrement d'*A.philoxeroides* de (ER) et de (P), ainsi que de (P) et (T), sur la richesse spécifique du milieu qu'elle occupe. Des tests de Kruskal-Wallis et/ou de Wilcoxon ont été réalisés pour 1) analyser l'effet du courant de (P) à 0%, 50% et 100% de hauteur d'eau sur la population, 2) étudier l'influence de la hauteur d'eau de (P) et (T) sur le recouvrement de *A.philoxeroides*, 3) étudier les variations du nombre de tiges de (P) et (T) entre les différents milieux (berge – mixte – aquatique), puis les sources de différences observées, 4) étudier les variations des paramètres physico-chimiques relevés (température, conductivité, pH, O<sub>2</sub> dissous) de (T) et (P).

### 2.4. Modélisation des niches bioclimatiques potentielles

La niche bioclimatique potentielle des deux espèces a été modélisée pour évaluer leur risque d'invasion, actuel et futur, en région PACA. La modélisation a été effectuée à l'aide du logiciel MaxEnt qui a été décrit comme l'une des méthodes les plus efficaces pour modéliser

la niche des espèces à l'aide de données de présences seules (Elith *et al.*, 2006 mais voir <https://methodsblog.wordpress.com/2013/02/20/some-big-news-about-maxent/>). MaxEnt est basé sur le principe de l'entropie maximale (Phillips *et al.*, 2006) et estime la répartition géographique des espèces à partir de données de points d'occurrences et d'un ensemble de variables environnementales (précipitations, température, etc.) à travers un paysage (background) défini par l'utilisateur (Merow *et al.*, 2013). Une grille de 10x10km (résolution de la modélisation) a été créée à l'échelle mondiale. Les occurrences de chacune des deux espèces ont été importées depuis les bases de données USGS (U.S. Geological Survey; <http://www.usgs.gov/>) et GBIF (Global Biodiversity Information Facility; <http://www.gbif.org/>) dans Excel avec leurs coordonnées en WGS84 puis importées sous ArcGIS®. De façon à ne pas biaiser la modélisation, les données d'occurrences ont été ramenées à une occurrence par maille de 10x10km (correspondant au centroïde de la maille). 1122 points ont ainsi été retenus pour *E.crassipes* et 351 pour *A.philoxeroides*. Pour la modélisation de la niche bioclimatique d'*A.philoxeroides*, sept variables ont été retenues « Température moyenne du trimestre le plus humide » (BIO8), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO 9), « Température moyenne du trimestre le plus chaud » (BIO 10), « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO11), « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO 16), « Précipitations du trimestre le plus sec » (BIO 17), « Précipitations du trimestre le plus chaud » (BIO 18). Les variables BIO9, BIO10, BIO11 ont été utilisées car l'exposition d'*A.philoxeroides* à de fortes chaleurs ou à des températures froides avec peu de précipitations, durant une longue période, entraîne une sénescence des individus. De même, les zones tempérées froides et tropicales chaudes ne sont pas des milieux favorables au développement de l'espèce, c'est pourquoi les variables BIO17, BIO18, BIO8, BIO16 ont également été prises en compte. Pour *E.crassipes*, les variables bioclimatiques retenues correspondent à « Isothermalité » (BIO3), « Température moyenne du trimestre le plus chaud » (BIO10), « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO11). Ces trois variables ont été sélectionnées car la croissance de l'espèce est sensible aux très fortes températures ainsi qu'aux plus froides. Ces variables bioclimatiques utilisées proviennent de la base de données mondiale WorldClim (<http://www.worldclim.org/>), avec une résolution de 10x10km (grid data en WGS84). Le niveau de corrélations entre les variables retenues sur critères écologiques, a été mesuré par l'utilisation de ENMTools. Les paires de variables présentant un taux de corrélation supérieur à 0,8 ont été simplifiées. Si le nombre de variables retenu au final était

inférieur à 3, des variables correspondant aux valeurs des axes issues d'une Analyse en Composante principale (ACP) réalisée sur les 19 variables bioclimatiques existantes ont alors été utilisées pour la modélisation.

Les résultats de MaxEnt sont affectés par la zone utilisée pour le background (Elith *et al.*, 2011), c'est pour cela qu'il faut exclure les zones où l'espèce ne peut pas être présente. Ceci permet de réduire la sur-ségrégation et obtenir des variations plus fines de présence/absence. La classification de Koeppen-Geiger (World Maps of Koeppen-Geiger climate classification) a été chargée sur ArcGIS®, en système de coordonnées WGS84. Seules les zones climatiques possédant des occurrences et correspondant à l'écologie des deux espèces ont été conservées pour l'ajustement du modèle comme réalisé par Webber *et al.*, 2011. L'ensemble des fichiers de variables bioclimatiques a été découpé selon ces zones. Toutes les combinaisons des fonctions de variables possibles entre "linear"/ "quadratic"/ "product" ont été modélisées. La fonction « threshold » (et la fonction « hinge » qui est une combinaison de threshold et de linear), étant connue pour apposer une contrainte et une complexité très forte au modèle, elle n'a pas été retenue. Chaque combinaison a été lancée en format « raw » avec les paramètres : un nombre maximal de points de background = 20000; un nombre de réplicats = 50 (Cross validation); un nombre maximum d'itérations = 1500; un seuil de convergence = 0,00001; pas d'extrapolation. Le modèle choisi est le modèle avec la valeur d'AUC (Area Under the Curve) la plus élevée (et la « Standard Deviation » (SD) la plus faible) ainsi que la valeur d'AIC (Aikake Information Criterion) la plus faible (calculée via ENMtools), moyennée sur les 50 réplicats. L'AUC correspond à l'écart entre le modèle choisi et un modèle aléatoire. Plus cet écart est grand, meilleur sera le modèle. L'AIC est un estimateur de validité du modèle selon le principe de parcimonie, il évalue la qualité d'ajustement du modèle aux données tout en prenant en compte sa complexité. Pour une meilleure lisibilité, le modèle choisi a été lancé en format "logistic" sur MaxEnt avec la même paramétrisation que précédemment. De plus, le modèle a été projeté sur les variables bioclimatiques futures récupérées sur WorldClim. Ces variables proviennent du Modèle Climatique Global (GCM) IPSL-CM5 (Dufresne *et al.*, 2013) et correspondent à une projection sur une période de 30 ans centrée sur 2070, selon le scénario RCP6.0 (pour une vision entre le meilleur et le plus pessimiste des scénarios carbone ; <http://pik-potsdam.de>). Enfin, pour effectuer la cartographie, les données issues de MaxEnt sont exportées dans ArcGIS®.

### 3. Résultats

#### 3.1. Vérification des présences de populations

Chacun des points d'observations passées (Ile de Loiselay près d'Avignon, en 1998 ; Canal du Vigueirat près de l'Etang de Berre, en 2007 ; Barrage de Bregançon près de Toulon en 2007 et Portail du Rouet, près de Draguignan, en 2013) ont été visités au mois de mai 2015. Les prospections n'ont pas révélé de présence actuelle d'*E.crassipes*. Pour *A.philoxeroides*, une population est avérée sur l'Ouvèze (site d'étude). Une seconde population possible n'a pu être confirmée par le CBNMed en Camargue (Domaine de la Palissade), pour cause de contraintes ne permettant pas l'accès au milieu.

#### 3.2. Suivi et impact de population d'*Alternanthera philoxeroides*

Le test de Shapiro a révélé la normalité des données de richesse spécifique pour (ER) (Shapiro: p-value = 0.8302), (P) (Shapiro : p-value = 0.7639) et (T) (Shapiro : p-value = 0.7735). Le test de Student n'a cependant pas révélé de différence significative en richesse spécifique entre (ER) et (T) (Student : p-value = 0.1229), entre (ER) et (P) (Student : p-value = 0,5419) ainsi qu'entre (P) et (T) (Student : p-value = 0,2855).

Le recouvrement d'*A.philoxeroides* et la force du courant aux trois niveaux d'eau considérés (0% - 50% - 100%) ne semblaient pas être liés (Kruskal-Wallis : p-value = 0,2163).

Les variations de hauteur d'eau et la présence de l'espèce ne semblaient pas être significativement liées (Kruskal-Wallis : p-value = 0,4433).

Le nombre de tiges érigées d'*A.philoxeroides* a révélé une variation significative entre les milieux (berge - mixte - aquatique) (Kruskal-Wallis : p-value =  $1,737.10^{-9}$ ). Les différences n'intervenaient qu'entre la berge et le milieu mixte (Wilcoxon : p-value =  $4,673.10^{-9}$ ) et la berge et le milieu aquatique (Wilcoxon : p-value =  $2,952.10^{-8}$ ), mais pas entre le milieu mixte et l'aquatique (Wilcoxon : p-value = 0,9112).

Les paramètres physico-chimiques entre (T) et (P) ne connaissaient pas de différences significatives mis à part au niveau de la conductivité. En effet, cette dernière était de  $643 \pm 15 \mu\text{S.cm}^{-1}$  à l'intérieur de la population d'*A.philoxeroides*, et de  $630 \pm 9 \mu\text{S.cm}^{-1}$  à l'extérieur (Wilcoxon : p-value =  $3,791.10^{-11}$ ).

#### 3.3. Modélisation des niches bioclimatiques potentielles

##### 3.3.a. *Alternanthera philoxeroides*

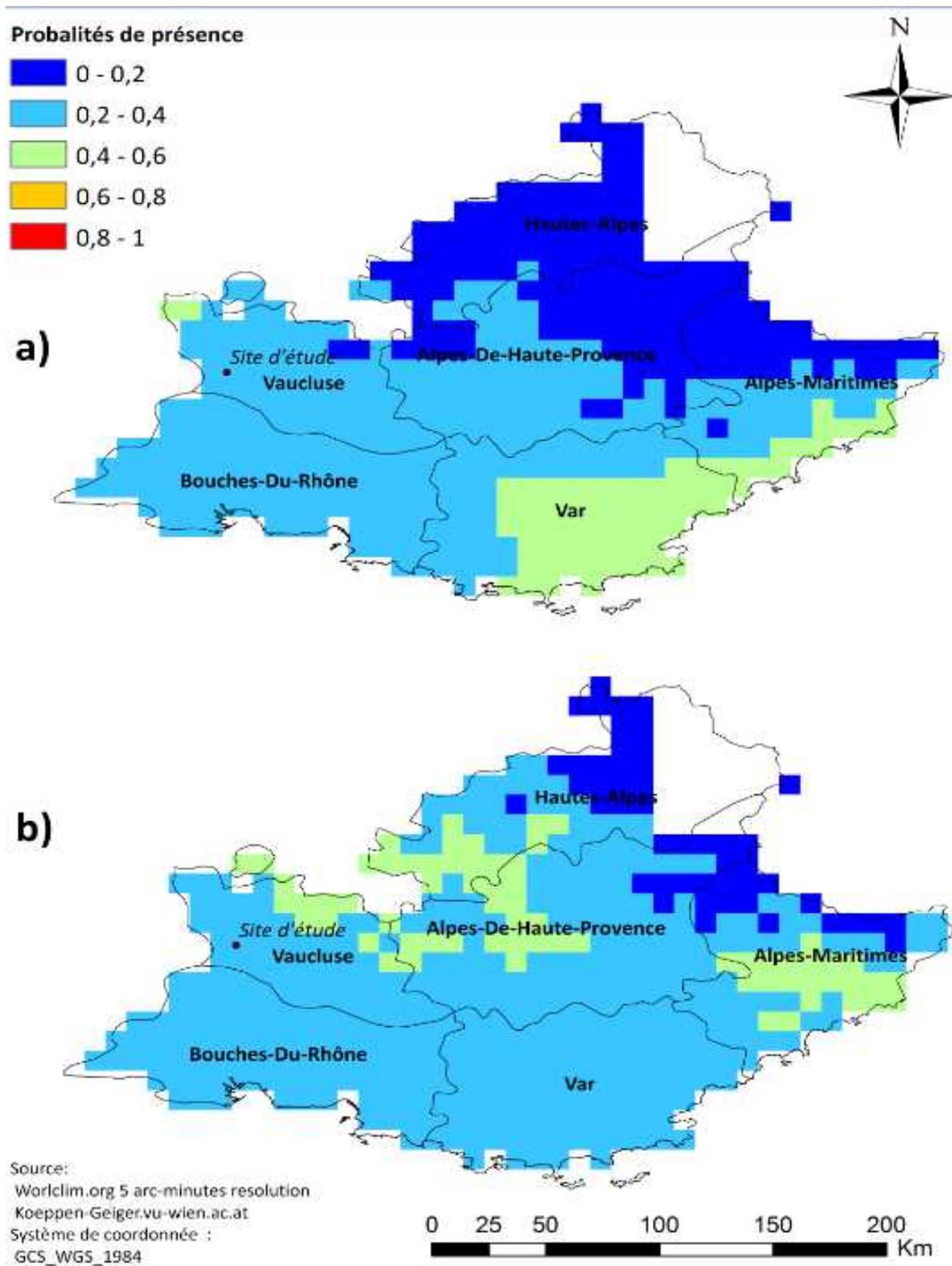


Figure 3 : Niche bioclimatique potentielle actuelle (a) et en 2070s (b) d'*A. philoxeroides* en région PACA.

Cette carte est issue du modèle linear/quadratic/product sous MaxEnt. Sept variables bioclimatiques ont été sélectionnées avec une résolution de 10x10km: « Température moyenne du trimestre le plus humide » (BIO 8), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO 9), « Température moyenne du trimestre le plus chaud » (BIO10), « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO 11), « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO 16), « Précipitations du trimestre le plus sec » (BIO 17), « Précipitations du trimestre le plus chaud » (BIO 18).

L'étude des corrélations entre les variables bioclimatiques sélectionnées se sont révélées correctes ( $<0,8$ ). Cependant, de fortes corrélations ont été observées entre BIO11-BIO9 (0,778) et BIO18-BIO16 (0,745). Ces 4 variables ont été conservées car celles-ci semblent être pertinentes pour l'écologie de l'espèce. De plus, MaxEnt est connu pour être robuste au niveau des corrélations entre les variables (Elith *et al.*, 2011). Le modèle retenu pour *A.philoxeroides* est celui combinant les fonctions linear/quadratic/product, présentant un AUC de 0.91 (SD = 0.044). L'algorithme a convergé après 1071 itérations. La niche bioclimatique potentielle d'*A.philoxeroides* modélisée à une échelle mondiale est présentée en (Annexe 2). En région PACA (Figures 4(a)), la probabilité de présence de cette espèce est comprise entre 0 et 0,6. Le Var est le département pour lequel la probabilité de présence est la plus importante contrairement aux zones montagneuses. La projection du modèle pour 2070s indique une probabilité de présence toujours comprise entre 0 et 0,6 (Figure 4(b)). Néanmoins et globalement, il est observé un décalage de la zone la plus favorable vers le Nord de la région, en milieu montagneux. Les courbes réponses et le jackknife permettent de déterminer que la « Température moyenne du trimestre le plus chaud » (BIO 10), la « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO 11), et « Précipitations du trimestre le plus sec » (BIO 17) influencent fortement le modèle tandis que « Température moyenne du trimestre le plus humide » (BIO 8) et « Précipitations du trimestre le plus chaud » (BIO 18) sont les variables les moins restrictives (Annexe 3): la probabilité de présence modélisée d'*A.philoxeroides* est faible dans les zones sèches avec de fortes précipitations et celles avec de fortes chaleurs et de faibles températures.

### **3.3.b. *Eichhornia crassipes***

Les corrélations entre les variables préalablement définies sur critères écologiques étant supérieures à 0,8, les variables utilisées pour l'ajustement du modèle correspondent aux trois premiers axes de l'ACP (Annexe 4). Le premier axe (PC1) est corrélé négativement aux variables bioclimatiques relatives à la température : « Température annuelle moyenne » (BIO1), « Température minimale du mois le plus froid » (BIO6), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO9) et « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO11). Les valeurs élevées de PC1 correspondent à des valeurs faibles de températures, et les valeurs faibles à des valeurs élevées de températures.

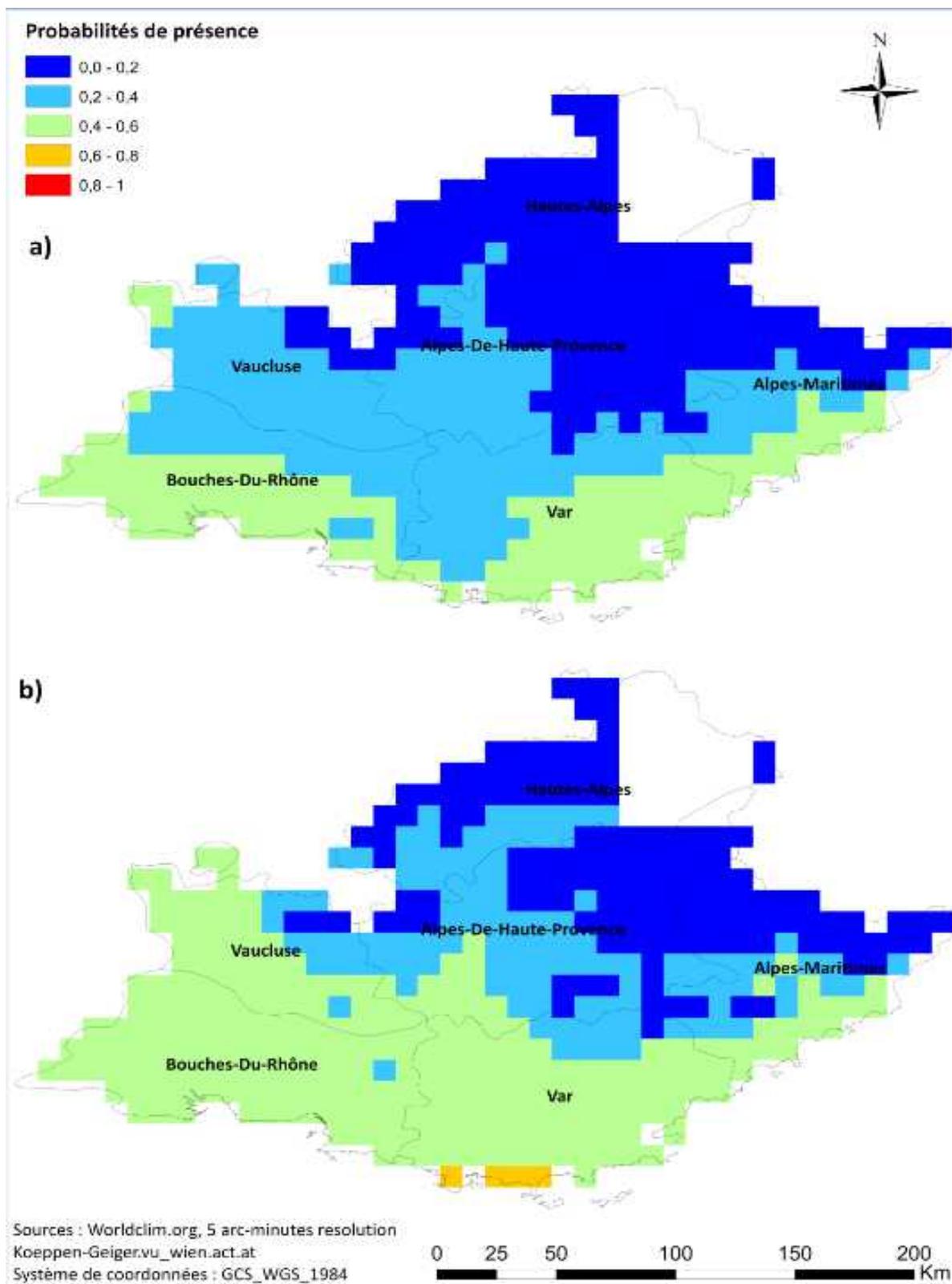


Figure 4 : Niche bioclimatique potentielle actuelle (a) et en 2070s (b) pour *E. crassipes* en région PACA.

Cette carte est issue du modèle linear/quadratic sous MaxEnt. Les variables bioclimatiques sélectionnées, de résolution 10x10km, correspondent aux 3 premiers axes de l'ACP. Les valeurs de PC1 correspondent aux variables bioclimatiques : « Température annuelle moyenne » (BIO1), « Température minimale du mois le plus froid » (BIO6), « Température moyenne du trimestre le plus sec » (BIO9) et « Température moyenne du trimestre le plus froid » (BIO11). Les valeurs du PC2 concordent avec « Précipitations du mois le plus sec » (BIO14) et « l'Écart de température journalier » (Moyenne mensuelle (Max temp – Min temp)) (BIO2). Les valeurs du PC3 correspondent à la « saisonnalité des températures » (BIO4) et aux « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO16).

Le second axe (PC2) est corrélé positivement à « Précipitations du mois le plus sec » (BIO14) et négativement à « l'Écart de température journalier » (Moyenne mensuelle (Max temp – Min temp)) (BIO2). Les valeurs élevées de PC2 correspondent donc à des précipitations du mois le plus sec relativement élevées et à un écart de température journalier faible. Les valeurs élevées de PC2 correspondent donc à des précipitations du mois le plus sec et à un écart de température important, et les valeurs faibles à l'inverse. Le troisième axe (PC3) est corrélé négativement à la « saisonnalité des températures » (Standard Deviation x 100) (BIO4) et positivement corrélé aux « Précipitations du trimestre le plus humide » (BIO16). Les valeurs élevées de PC3 correspondent à une faible saisonnalité des températures et des fortes précipitations durant le trimestre le plus humide, et inversement aux valeurs faibles. Le modèle retenu pour *E.crassipes* est celui combinant les fonctions linear/quadratic, présentant un AUC de 0.7619 (SD = 0.04). L'algorithme a convergé après 100 itérations. La niche bioclimatique potentielle d'*E.crassipes* modélisée à une échelle mondiale est présentée en (Annexe 5). En région PACA (Figures 5(a)), la probabilité de présence de cette espèce est comprise entre 0 et 0,6. La frange littorale est la zone pour laquelle la probabilité de présence est la plus importante contrairement aux zones montagneuses. La projection du modèle pour 2070s indique une probabilité qui augmente, avec une présence comprise entre 0 et 0,8 (Figure 5(b)). Il est observé un élargissement de la zone vers le Nord de la région, en milieu montagneux. De plus, une forte probabilité de présence (0,6 à 0,8) est observée dans le Var, entre Bandol et Le Lavandou. Ainsi, sa probabilité de présence augmente globalement en région PACA avec le réchauffement climatique.

#### 4. Discussion

Dans le cadre de la vérification des présences de populations d'*A.philoxeroides* et d'*E.crassipes* en PACA, les prospections des points d'occurrences passées n'ont pas révélé de présences actuelles de ces espèces. Seule une population d'*A.philoxeroides* est avérée sur l'Ouvèze (site d'étude). Concernant *E.crassipes*, les observations pour cette année 2015 ont potentiellement été effectuées prématurément. En effet, les points d'occurrences passées ont été notés plus tard dans la saison (de Juin à Octobre). La présente étude ne permettait pas d'effectuer ces observations à la même période. L'absence d'*E.crassipes* s'expliquerait alors par sa sensibilité au gel, détruisant sa biomasse flottante lors des variations de températures (Gopal, 1987), les graines entrant en dormance, se maintenant dans les sédiments, et germant

lorsque les conditions sont favorables (Gunnarsson & Petersen, 2007). Aucune différence de richesse spécifique n'a été remarquée entre les trois milieux étudiés (Population, Témoin et Écosystème de Référence) semblant indiquer qu' *A.philoxeroides* n'a pas d'impact sur la communauté végétale. Cependant, cette observation possède de nombreuses limites. Tout d'abord, l'écosystème de référence a été choisi afin d'effectuer les comparaisons entre deux écosystèmes de berge (référence et population d'*A.philoxeroides* établie). Mais leur exposition et donc la dynamique du milieu diffèrent, ce qui peut influencer les données de richesse spécifique (Pickett & Parker, 1994). De plus, la récolte de données a été effectuée tôt dans la saison (Sainty *et al.*, 1997), quand *A.philoxeroides* n'est pas encore suffisamment développée pour occuper l'intégralité du milieu colonisable et ainsi impacter la communauté végétale. L'espèce est normalement capable de coloniser la berge, bien qu'elle soit enracinée en milieu aquatique et qu'elle y forme des tapis denses à la surface de l'eau (Vogt *et al.*, 1979). La température extérieure peut être alors un facteur limitant de son développement à cette saison, la favorisant en milieu aquatique (température plus stable) (Yu *et al.*, 2007). Ainsi, dans les habitats aquatiques, la plupart des parties immergées peuvent survivre à l'hiver et produire des rejets rapidement en Mars-Avril (Genga *et al.*, 2006), ceci expliquant la présence dominante d'*A.philoxeroides* en milieu aquatique/mixte à cette saison. Néanmoins, même s'il n'est pas observé de modification de la richesse spécifique sur la berge, une tendance à l'implantation de *Ludwigia sp.* dans les zones de colonisations aquatiques par *A.philoxeroides* est notée. En effet, lorsque *A.philoxeroides* est faiblement présente, *Ludwigia sp.* semble s'installer. *A.philoxeroides* produit une litière riche en azote et en phosphore. Ainsi, de par sa décomposition rapide et son caractère invasif, elle entraîne un apport important de matières sur un court espace-temps (Basset *et al.*, 2010). Ce pic aigu de nutriments va alors être libéré de manière inhabituelle dans l'écosystème permettant l'invasion d'*A.philoxeroides* ainsi que d'autres espèces envahissantes ou encore la prolifération d'algues. Ceci illustre le processus de « invasional meltdown » où les espèces envahissantes facilitent l'apparition de nouvelles espèces invasives (O'Dowd *et al.*, 2003). Cette propriété pourrait donc expliquer la présence de *Ludwigia sp.* Néanmoins, lorsque le recouvrement d'*A.philoxeroides* est important ou nul, le constat inverse semble s'observer sur ce site. Ceci peut alors s'expliquer par une compétition interspécifique qui favoriserait *A.philoxeroides*.

Aucune variation des paramètres physico-chimiques n'a été observée entre les témoins et la population, mis à part au niveau de la conductivité. En effet, elle y est plus forte au sein de la

population, comparée aux témoins. Cette variation pourrait être expliquée par la décomposition rapide de l'espèce, entraînant une augmentation des ions dans l'eau, notamment des ions minéraux (Basset *et al.*, 2010). De plus, cette étude n'a pas montré de lien entre la force du courant et la présence d'*A.philoxeroides*. Cette dernière a été retrouvée pour toutes les hauteurs d'eau présentes sur le site d'étude. Néanmoins, la détermination d'une hauteur d'eau limitante n'a pu être établie ici, car celles mesurées dans les placettes n'atteignaient pas une profondeur suffisante. Le suivi diachronique de son étendue permettra d'étudier, grâce aux données complémentaires, l'influence d'*A.philoxeroides* sur le milieu et/ou l'influence du milieu sur celle-ci, sur le long terme. Enfin, ne possédant qu'une seule population pour cette étude, il est difficile d'établir des résultats pouvant être généralisés.

La modélisation des niches bioclimatiques potentielles d'*A.philoxeroides* et d'*E.crassipes* en région PACA fournit des résultats sur leur répartition potentielle actuelle et future (2070s).

Pour *A.philoxeroides*, l'étendue géographique favorable augmente entre ces deux périodes. Actuellement la probabilité la plus importante de présence se situe sur la bande littorale de l'Est de la région. Mais en 2070s, celle-ci chute sur cette même zone tandis qu'elle augmente au Nord de la région. Cela laisse supposer que le climat des côtes deviendra trop chaud et/ou trop sec (baisse des précipitations moyennes visible à partir de 2050 et des extrêmes plus marqués : sécheresses et pluies intenses) (<http://www.météofrance.fr>) pour *A.philoxeroides* qui est une espèce invasive de milieu plutôt tempéré. De plus, certaines études laissent supposer que les espèces exotiques invasives seront favorisées par le réchauffement climatique, contrairement aux espèces invasives de climat tempéré (Weber & Gut, 2004). En ce qui concerne *E.crassipes*, la zone potentiellement favorable s'étend à une grande partie de la région, et plus encore en 2070s. En effet, de même qu'*A.philoxeroides*, celle-ci s'élargit vers le Nord dans les zones actuellement froides. L'augmentation de la disponibilité des milieux humides (par l'accroissement des précipitations du mois le plus humide) et des températures lui permettront d'étendre sa zone potentiellement favorable. Cependant, la zone la plus favorable en 2070s est située à l'extrême Sud du Var, près de la ville de Hyères, connue pour ses salins. Or, l'espèce ne peut supporter de fortes concentrations de sels dans l'eau, il est donc peu probable que l'espèce puisse effectivement s'établir dans cette zone. Face aux résultats des niches bioclimatiques potentielles des deux espèces, une surveillance accrue des milieux aquatiques (naturels et artificiels) des zones révélées les plus favorables doit être réalisée. Ce travail repose notamment sur la sensibilisation des différents gestionnaires

d'espaces naturels, ainsi que des horticulteurs de la région aux dangers liés à ces nouvelles espèces et à leur dissémination. *A. philoxeroides* se retrouve notamment dans les systèmes d'irrigation et peut ainsi contaminer les cultures (notamment de riz et de blé) et les pâturages. *E. crassipes* se développe quant à elle principalement dans les zones stagnantes, et apprécie les eaux riches (sorties de stations d'épurations, usines, etc.). Enfin, la projection en 2070s effectuée afin de modéliser la niche bioclimatique potentielle de chacune des deux espèces utilise un Modèle Climatique Global (GCM). Ceci correspond à une projection sur une période de 30 ans centrée sur 2070s, selon le scénario RCP6.0 qui équivaut à une vision entre le plus optimiste et le plus pessimiste des scénarii carbone. Afin d'augmenter la précision des résultats de la modélisation des deux espèces invasives, la projection devrait être réalisée également sur RCP4.5 et RCP8.5, afin d'obtenir les résultats sur tous les scénarios fournis. La plupart des modèles climatiques simulent l'évolution du climat passé et futur à l'échelle mondiale. Leur résolution, de l'ordre de la centaine de kilomètres, est suffisante pour comprendre la dynamique à grande échelle de la planète et produire par exemple des moyennes de température. À cette échelle, les spécificités régionales du climat ne peuvent cependant pas être correctement représentées (<http://www.météofrance.fr>).

## 5. Conclusion

A l'aide des données GPS des points d'observations existants d'*A. philoxeroides* et *E. crassipes*, une vérification des points d'occurrences passées a été effectuée en région PACA. Concernant *E. crassipes*, de nombreux sites ont été signalés dans le passé. Cependant les prospections de mai 2015 n'ont pu confirmer ces observations. Il est fort probable que l'espèce n'ait pas pu être à nouveau observée en raison de prospections prématurées. Pour *A. philoxeroides*, une population pérenne a été identifiée sur l'Ouvèze à Sorgues, en 2013. De plus, la présence d'une autre population en Camargue, signalée en 2015, n'a pas pu être confirmée. Il serait donc intéressant de réeffectuer, pour ces deux espèces, des prospections sur les sites répertoriés et sur de nouveaux secteurs, lors des pics de biomasse propres à chacune. Sur le site de Sorgues, un protocole de suivi diachronique de l'étendue d'*A. philoxeroides* a été mis en place. Il permettra d'étudier la vitesse d'expansion et l'influence de la plante sur ce milieu. Cette étude constituant un premier état des lieux de la population, il est difficile de montrer l'impact de l'espèce sur son milieu mais à long terme l'acquisition des données permettra ou non, de le déterminer. La modélisation de la niche bioclimatique potentielle de chaque espèce a permis de montrer qu'elles ont toutes deux une

probabilité importante de s'installer sur la bande littorale de la région PACA. En ce qui concerne les projections de 2070s, la niche bioclimatique d'*E.crassipes* s'étend au Nord. Celle d'*A.philoxeroides* diminue au niveau du littoral alors que de nouvelles zones favorables apparaissent au Nord de la région. Il semble donc qu'*A.philoxeroides* ne soit pas une menace à long terme en région PACA, contrairement à *E.crassipes* qui représentera un danger plus grand encore qu'aujourd'hui avec les changements globaux. Mais ces résultats ne tiennent pas compte de tous les autres facteurs environnementaux et ne donnent qu'une indication vague du risque d'installation des espèces. Il semble donc important de continuer la surveillance de ces espèces et d'améliorer les connaissances sur leur écologie pour prévenir de leur expansion. De plus, des mesures de gestion devraient être mises en place rapidement afin d'éviter toute invasion les rendant incontrôlables. Pour les deux espèces, il est ici préconisé une méthode d'arrachage/récolte manuel répété sur plusieurs années, avec compostage de la biomasse. Cette gestion est adaptée aux petites populations. C'est pour cette même raison que l'utilisation d'agents biologiques n'est pas proposée. Néanmoins, si ces espèces parvenaient à se développer sur de vastes étendues, d'autres mesures comme la valorisation pourraient alors être envisagées.

## 6. Références bibliographiques

- Barrett, S.C.H., Forno, I.W., 1982. Style morph distribution in New World populations of *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth), *Aquatic Botany*, 13: 299–306
- Bassett, I.E., Beggs, J.R., Paynter, Q., 2010. Decomposition dynamics of invasive alligator weed compared with native sedges in a Northland lake, *New Zealand Journal of Ecology*, 34: 324-331
- Center, T. D., Hill, M. P., Cordo, H., Julien, M. H., 2002. *Waterhyacinth*. In *Biological Control of Invasive Plants in the Eastern United States*, edition R. G. van Driesche, S. Lyon, B. Blossey, M. S. Hoddle and R. Reardon. Morgantown, WV: USDA Forest Service, 41–64
- Chatterjee, A. & Dewanji, A., 2012. Peroxidase as a metric of stress tolerance and invasive potential of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) growing in aquatic habitats, *Management of biological invasions*, 3, 2: 65
- Coetzee, J.A., Hill, M.P., Julien, M.H., Center, T.D, Cordo, H.A., 2009. *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms–Laub. (Pontederiaceae) in: *Biological Control of Tropical Weeds Using Arthropods*, edition Rangaswamy Muniappan, Gadi V.P.Reddy, Anantanarayanan Raman, 183-210
- D'Antonio, C. M., & Vitousek, P. M., 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23: 63–87
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A ., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O ., *et al*, 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to

CMIP5, *Climate Dynamics*, 40: 2123-2165

Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan et al., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data, *Ecography*, 29: 129–151

Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., En Chee, Y., Yates J.C., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists, *Diversity and Distributions*, 17: 43-57

François, J., 1969. Recherches expérimentales sur l'écologie de la jacinthe d'eau *E. crassipes* (Mart)Solms, Doct. Thesis, Fac. Sci. Agronom. Gembloux, Belgium

Genga, Y.P., Pana, X.P, Xub, C.Y., Zhanga, W.J., Lia, B., Chena, J. K., 2006. Phenotypic plasticity of invasive *Alternanthera philoxeroides* in relation to different water availability, compared to its native congener, *Acta Oecologica Ica*, 30: 380

Gopal.B, 1987. *Water hyacinth*, edition Elsevier, Amsterdam, 471

Gunnarsson, C.C., & Petersen, C.M., 2007. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: a literature review, *Waste Management*, 27:117–129

Hellmann, J.J., Byers, J.E., Bierwagen B.G., Dukes, J.S., 2008. Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species, *Conservation biology*, 22, 3: 534 – 543

Jorge, A., Bolanos, D., J. Longstreth, 1984. Salinity Effects on Water Potential Components and Bulk Elastic Modulus of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb, *Plant Physiology*, 75: 281-284

Julien, M.H., Chan, R.R., Low, V., 1992. Growth of the weed *Alternanthera philoxeroides* (Martius) Grisebach, (alligator weed) in aquatic and terrestrial habitats in Australia, *Plant Protection Quarterly*, 7: 1-7

Julien, M.H., Skarratt, B., Maywald, G.F., 1995. Potential Geographical Distribution of Alligator Weed and its Biological Control by *Agasicles hygrophila* J, *Aquatic Plant Management*, 33: 55-60

Julien, M.H, 2008. Plant biology and other issues that relate to the management of water hyacinth: a global perspective with focus on Europe, *Bulletin OEPP*, 38,3: 477 – 486

Kolar, C. S. & Lodge D. M., 2001. Progress in invasion biology: predicting invaders, *Trends in Ecology and Evolution*, 16: 199–204

LiLi, C., Yan, Y., XingJin, H., 2008. Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China, *Sheng wu duo yang xing*, 16, 6 : 578

Liu, C., Wu, G., Yu, D., Wang, D., Xia, S.L., 2004. Seasonal changes in height, biomass and biomass allocation of two exotic aquatic plants in a shallow eutrophic lake, *Journal of Freshwater Ecology*, 19: 41–45

Mack, R. N., Simberloff, D., Lonsdale, W. M., Evans, H., Clout, M., Bazzaz, F. A., 2000. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control, *Ecological Applications*, 10: 689–710

Mangas-Ramirez,E., & Elias-Gutierrez, M., 2004. Effect of mechanical removal of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on the water quality and biological communities in a

- Mexican reservoir, *Journal of Aquatic Health and Management*, 7: 161–168
- Merow, C., Smith, M.J., Silander, J.A., 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter, *Ecography* 36: 1–12
- O'Dowd, D.J., Green, P.T., Lake, P.S., 2003. Invasional 'meltdown' on an oceanic island, *Ecology Letters*, 6: 812–817
- Pan, X.Y., Geng, Y., Zhang, W., Li, B., Chen, J., 2006. The influence of abiotic stress and phenotypic plasticity on the distribution of invasive *Alternanthera philoxeroides* along a riparian zone, *Acta oecologiae*, 30: 333–341
- Pan, X.Y., Xin, J., Fu, J.D., Li, B., 2013. Geographical diversification of growth–defense strategies in an invasive plant, *Journal of Systematics and Evolution Special Issue: Human and human-influenced evolution*, 51, 3: 308–317
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological Modelling*, 190: 231–259
- Pickett, S.T.A., & Parker, V.T., 1994. Avoiding the old pitfalls: opportunities on a new discipline, *Restoration Ecology*, 2: 75–79
- Sainty, G., McCorkelle, G., Julien, M., 1997. Control and spread of Alligator Weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., in Australia: lessons for other regions, *Wetlands Ecology and Management*, 5, 3: 195–201
- Sculthorpe C.D., 1967. *The Biology of Aquatic Vascular Plants*, edition Edward Arnold, London
- Spencer, N. R., and Coulson, J. R., 1976. The biological control of alligator weed *Alternanthera philoxeroides* in the United States of America, *Aquatic Botany*, 2: 177–190
- Téllez, T.R., Lopez, E.M., Granado, G., Albano Pérez, E., López R.M., Guzmán, J.M.S., 2008. The Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain), *Aquatic Invasions*, 3: 42–53
- Van Oosterhout, 2007. Alligator weed control manual Eradication and suppression of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in Australia, NSW – DPI, 90
- Vogt, G.B., McGurie J.U., Cushman A.D., 1979. Probable evolution and morphological variation in South American Disonychine flea beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) and their Amaranthaceous hosts USDA, *Technical Bulletin*, 1593: 148
- Walther, G. R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pyšek, P., Kühn, I., *et al.*, 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities, *Trends in ecology & evolution*, 24,12: 686 – 693
- Webber, B.L., Yates C.J., Le Maitre D.C., Scott J.K., Kriticos D.J., Ota N. *et al.*, 2011. Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models, *Diversity and Distribution*, 17, 5 : 978–1000.
- Weber, E., & Gut D., 2004. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe, *Journal for Nature Conservation*, 12,3: 171–179

Xie, Y., & Yu, D., 2003. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), *Aquatic Botany*, 75: 311–321

Yu, L.Q., Fujii, Y., Zhou, Y.J., Zhang, J.P., Lu, Y.L., Xuan, S.N., 2007. Response of Exotic Invasive Weed *Alternanthera philoxeroides* to Environmental Factors and Its Competition with Rice, *Rice science*, 14, 1: 49 - 55

Zhang X., Ye Y., Zhang X., Li D., Du W., 2004. The reproductive and invasive characteristics of *Alternanthera philoxeroides*, *Henan Science*, 22: 60–62

Conservatoire Botanique Méditerranéen de Porquerolles, 2011. <http://www.cbnmed.fr/pres/index.php>. Consulté le 20/05/2015

Global Biodiversity Information Facility. <http://www.gbif.org/occurrence> Explore occurrences. Consulté le 30/03/2015

Global invasive species database, 2006. *Eichhornia crassipes*. <http://www.issg.org/database/species/search.asp?sts=sss&st=sss&fr=1&x=8&y=6&sn=eichhornia+crassipes&rn=&hci=-1&ei=-1&lang=EN>. Consulté le 06/05/2015.

Global invasive species database, 2010. *Alternanthera philoxeroides*. <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?si=763&fr=1&sts=sss&lang=EN> . Consulté le 06/05/2015.

Masterson, J., 2007, *Alternanthera philoxeroides*, Smithsonian Marine Station at Fort Pierce, [http://www.sms.si.edu/irlspec/alternanthera\\_philoxeroides.htm](http://www.sms.si.edu/irlspec/alternanthera_philoxeroides.htm), consulté le 21/05/2015

MétéoFrance. *Impacts du changement climatique sur les phénomènes hydrométéorologiques, Changement climatique et épisodes méditerranéens*. <http://www.meteofrance.fr/climatpasseetfutur/changementclimatique/impactsduchangementclimatiquesurlesphenomeneshydrometeorologiques/changementclimatiqueetepisodesmediterranéens>. Consulté le 20/05/2015

Office de l'Environnement de la Corse, 2010. “Une invasive à surveiller en Corse : la jacinthe d'eau”. <http://www.oec.fr/modules.php?name=News&file=print&sid=201> Consulté le 06/05/2015

Potsdam Institute for climate impact research, RCP Concentration Calculation and Data. <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>. Consulté le 20/05/2015

U.S. Geological Survey. <http://www.usgs.gov/pubprod/> Maps, Imagery, and Publications. Consulté le 03/03/2015

WorldClim [http://www.worldclim.org/cmip5\\_10m](http://www.worldclim.org/cmip5_10m) . CMIP5 10-minutes. Consulté le 20/05/2015

WorldClim <http://www.worldclim.org/bioclim>. Bioclim. Consulté le 20/05/2015

World Maps of Köppen-Geiger Climate Classification. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm> . Present climate. Consulté le 03/03/2015

## GLOSSAIRE

**CBNMed:** Conservatoire botanique national méditerranéen de Porquerolles. Il réalise des inventaires de la flore et des habitats naturels et semi-naturels, en collaboration avec un réseau de scientifiques et de botanistes de terrain. De plus, le conservatoire est amené à réaliser des prospections, à animer un réseau de collaborateurs, à recueillir de l'information et enfin à compiler l'information historique en exploitant des documents bibliographiques.

**SILENE:** Système d'information et de Localisation des Espèces Natives et Envahissantes. Cette base de données a été élaborée par le CBNMed en collaboration avec le CBN Alpin. Toutes les données Flore sont des données validées par les deux conservatoires botaniques qui s'engagent ainsi sur la valeur scientifique des informations fournies. Ces données proviennent de plusieurs sources et sont classées en données actuelles (postérieures à 1990) et données anciennes.

**ONCFS:** Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage. C'est un établissement public chargé de la connaissance de la faune sauvage et de ses habitats à travers des études et des recherches, de la police de la chasse et de l'environnement, de l'appui technique auprès des décideurs politiques, aménageurs et gestionnaires de l'espace rural et de l'organisation et la délivrance du permis de chasser.

**ONEMA:** Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques. C'est un organisme technique français de référence sur la connaissance et la surveillance de l'état des eaux et sur le fonctionnement écologique des milieux aquatiques.

**CEN PACA:** Conservatoire d'Espaces Naturels de Provence-Alpes-Côte d'Azur. C'est une association à but non lucratif, reconnue d'intérêt général, qui a pour mission la préservation du patrimoine naturel de la région PACA. Il réalise des études scientifiques, des suivis naturalistes, gère des espaces naturels et mène des campagnes d'informations et de sensibilisation du public et les décideurs.

**GT-IBMA:** Groupe de Travail spécifique Invasions Biologiques en Milieux Aquatiques. En mobilisant différents types d'acteurs, le groupe constitue une plate-forme de travail avec pour objectif principal d'apporter un appui à la gestion des espèces exotiques envahissantes. Ce site Internet permet l'accès à de nombreuses informations sur les espèces exotiques envahissantes impactant les écosystèmes aquatiques et sur les stratégies pour mieux les gérer.

**Tour du Valat:** Le Domaine de la Tour du Valat est un centre de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes.

**Réserve naturelle de Camargue:** La réserve nationale de Camargue fait partie des plus grandes réserves de zones humides d'Europe. Son territoire bénéficie d'une protection intégrale. La Société Nationale de Protection de la Nature, association à but non lucratif reconnue d'utilité publique, agit pour la sauvegarde des espèces et des milieux menacés. Elle est le gestionnaire de la Réserve naturelle de Camargue.

**ECO-MED:** ECO-MED est un bureau d'études, d'expertises et de conseil en environnement naturel spécifiques à l'aménagement du territoire et à la mise en valeur des milieux naturels. Il intervient depuis l'année 2003 auprès d'aménageurs, d'industriels et d'organismes publics.

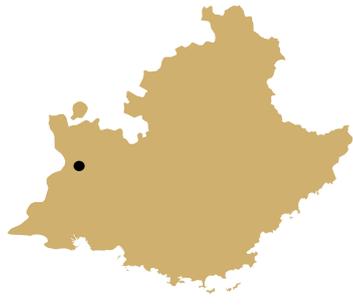
**RRGEMA:** Réseau Régional des Gestionnaires de Milieux Aquatiques. Le réseau fédère les organismes publics ou associatifs engagés dans une politique active de gestion, d'aménagement et de restauration des milieux aquatiques en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

**Réserve naturelle nationale du marais du Vigueirat:** La réserve naturelle nationale des marais du Vigueirat (RNN175) est une réserve naturelle nationale située en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Les terrains ont été acquis par le Conservatoire du littoral et leur gestion a été confiée à l'association des Amis des marais du Vigueirat. Le site fait partie de la zone centrale de la Réserve de biosphère de Camargue (programme MAB de l'Unesco).

**UICN, le comité français:** Créé en 1992, le Comité français de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature est le réseau des organismes et des experts de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature en France. Le Comité français de l'UICN s'est fixé deux missions principales : répondre aux enjeux de la biodiversité en France et valoriser l'expertise française à l'international.

Annexe 1 : Relevés de terrain sur la population connue de *A.philoxeroides* (Site d'étude (a), fiche de relevés (b) et références des sondes utilisées (c)).

*(a) Site d'étude (Ouvèze, Sorgues)*



*La population est représentée par le linéaire rouge sur la carte.*



<https://www.google.fr/maps/@44.0113709,4.8691106,665m/data=!3m1!1e3?hl=fr>

**(b) Fiche de relevés**

Fiche suivi de population : *Alternanthera philoxeroides*

Site :	N° Placette :	Nom :	Date :
Altitude :		Pente (au niveau de la berge) :	
Exposition :		Courant : 0% :	50% : 100% :
Aspect général :			
Recouvrement substrat	Classes	Recouvrement végétation	Classes
Rochers :	1 : 5 - 10 %	Hauteur moyenne (cm) :	1 : 5 - 10 %
Bloc (>20cm) :	2 : 10 - 25 %	Couverture total (%) :	2 : 10 - 25 %
Cailloux (<20cm) :	3 : 25 - 50 %	Arbres hauts (> 10m) :	3 : 25 - 50 %
Terre nue :	4 : 50 - 75 %	Arbres (4-10m) :	4 : 50 - 75 %
Litière/humus :	5 : > 75 %	Arbustes hauts (2-4m) :	5 : > 75 %
Type substrat :		Herbacées (<0.5m) :	
Relevés phytosociologiques + classes de recouvrement			

Relevés par cellule									
	N	Nbr tiges	H veg	H eau	Paramètres physico-chimiques				
					T° eau	Conduc eau	pH eau	O <sup>2</sup> [ ]	O <sup>2</sup> dissous %
Milieu Terrestre	A								
	B								
	C								
	D								
Milieu Mixte	E								
	F								
	G								
	H								
Milieu aquatique	I								
	J								
	K								
	L								

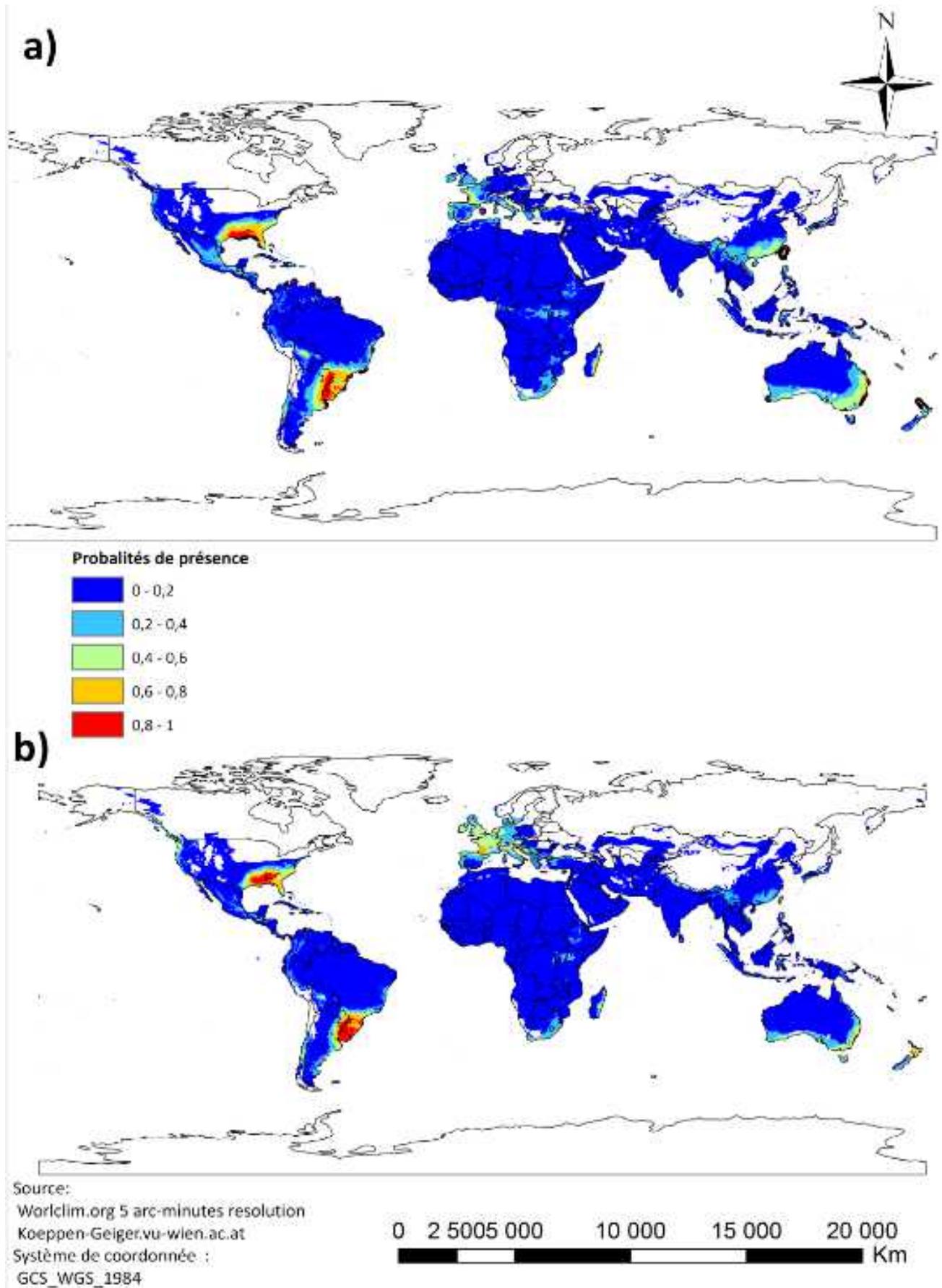
**(c) Références des sondes utilisées :**

\* Sondes HACH avec

- sonde à luminescence pour oxygène dissous
- sonde à membrane pour le pH
- sonde pour la conductivité

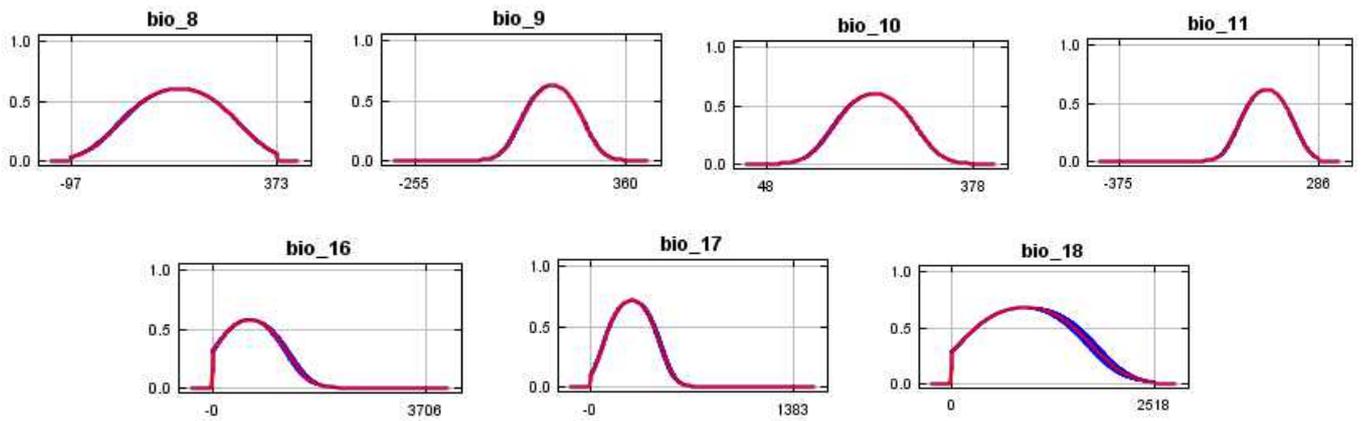
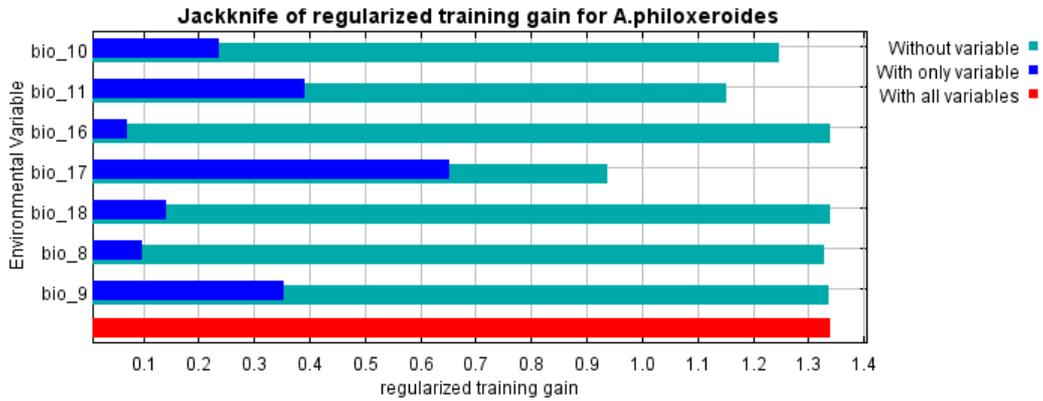
\* Courantomètre Marsh-McBirney, Model 2000, Flo-Mate

Annexe 2: Niche bioclimatique potentielle mondiale actuelle (a) et en 2070s (b) pour *A.philoxeroides*.

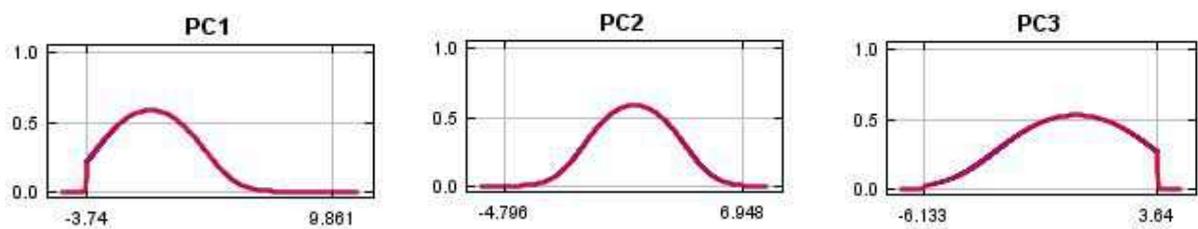


Annexe 3: Résultats des contributions de chaque variable bioclimatique à la modélisation des niches bioclimatiques potentielles de *A. philoxeroides* (a) et de *E. crassipes* (b).

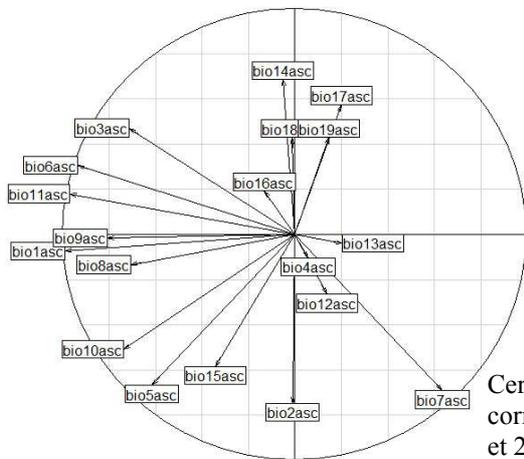
(a)



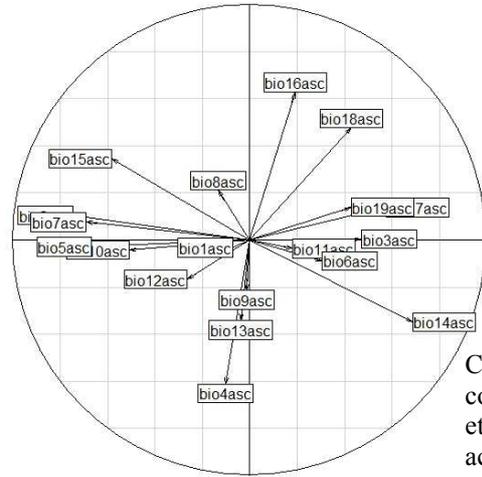
(b)



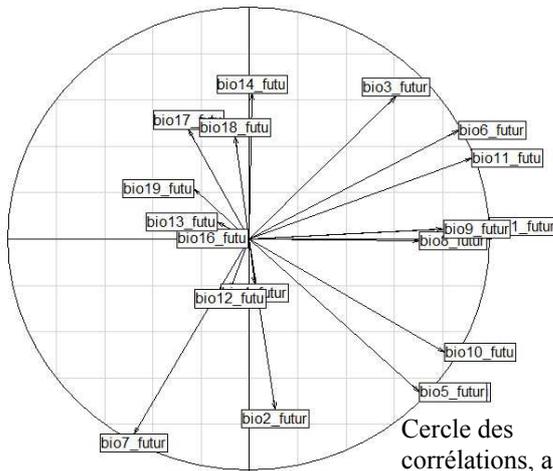
## Annexe 4 : Résultats des Analyses en Composantes Principales réalisées sur les variables bioclimatiques.



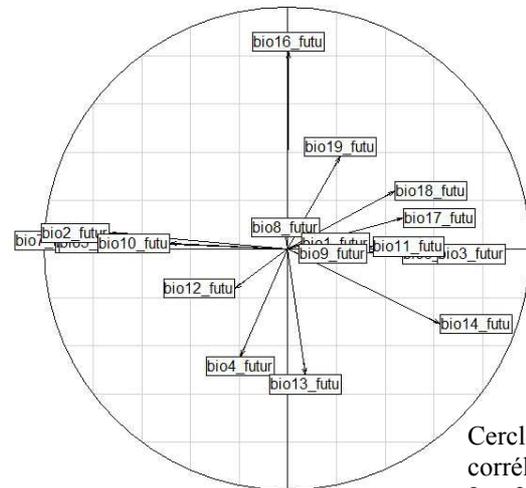
Cercle des corrélations, axes 1 et 2, bioclimes actuels



Cercle des corrélations, axes 2 et 3, bioclimes actuels



Cercle des corrélations, axes 1 et 2, bioclimes futurs (2070s)



Cercle des corrélations, axes 2 et 3, bioclimes futurs (2070s)

\$col.rel	Comp1	Comp2	Comp3	con. tra
bio14asc	-27	4709	-1208	526
bio13asc	416	-15	-1174	526
bio12asc	188	-701	-278	526
bio11asc	-9388	325	-13	526
bio10asc	-5449	-2583	-19	526
bio17asc	397	3304	190	526
bio18asc	-2	1842	2277	526
bio19asc	212	1837	192	526
bio1asc	-9784	-53	-11	526
bio2asc	-1	-5579	109	526
bio3asc	-5112	2213	0	526
bio4asc	31	-106	-3738	526
bio16asc	-174	368	3955	526
bio15asc	-1175	-3407	1197	526
bio9asc	-6536	-2	-459	526
bio8asc	-5025	-180	447	526
bio7asc	4028	-4775	57	526
bio6asc	-8772	929	-77	526
bio5asc	-3797	-4451	-8	526

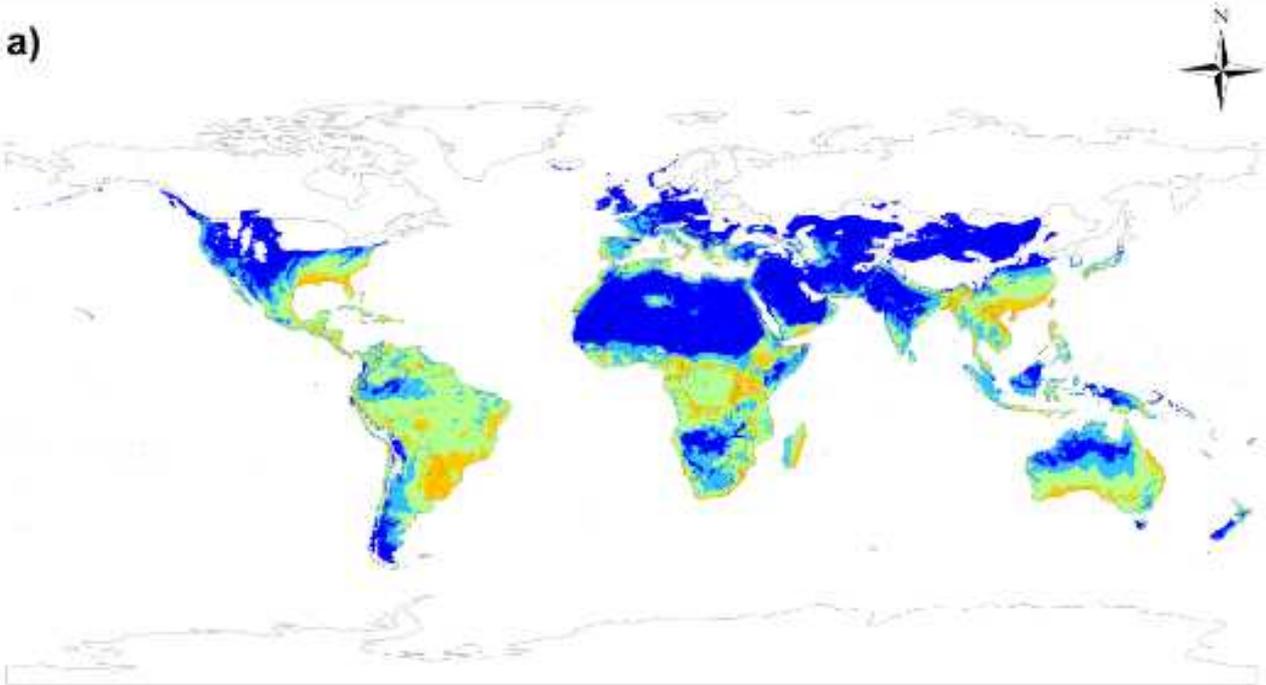
Contribution de chaque bioclim aux axes des ACP (bioclimes actuels)

\$col.rel	Comp1	Comp2	Comp3	con. tra
bio8_futur	4925	-1	26	526
bio7_futur	-2287	-7082	12	526
bio16_futu	0	0	6654	526
bio17_futu	-634	2248	165	526
bio15_futu	4953	-4361	6	526
bio6_futur	7525	2206	-4	526
bio14_futu	1	3926	-954	526
bio5_futur	4953	-4361	6	526
bio4_futur	4	-378	-1985	526
bio13_futu	-183	53	-2707	526
bio12_futu	-64	-476	-270	526
bio3_futur	3687	3772	-4	526
bio11_futu	8472	1218	1	526
bio2_futur	114	-5398	42	526
bio10_futu	6547	-2376	6	526
bio19_futu	-530	465	1462	526
bio1_futur	9845	30	6	526
bio18_futu	-36	1941	572	526
bio9_futur	6436	19	-4	526

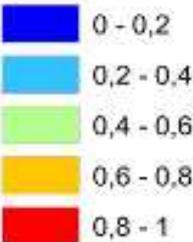
Contribution de chaque bioclim aux axes des ACP (bioclimes futurs (2070s))

Annexe 5 : Niche bioclimatique potentielle mondiale actuelle (a) et en 2070s (b) pour *E.crassipes*.

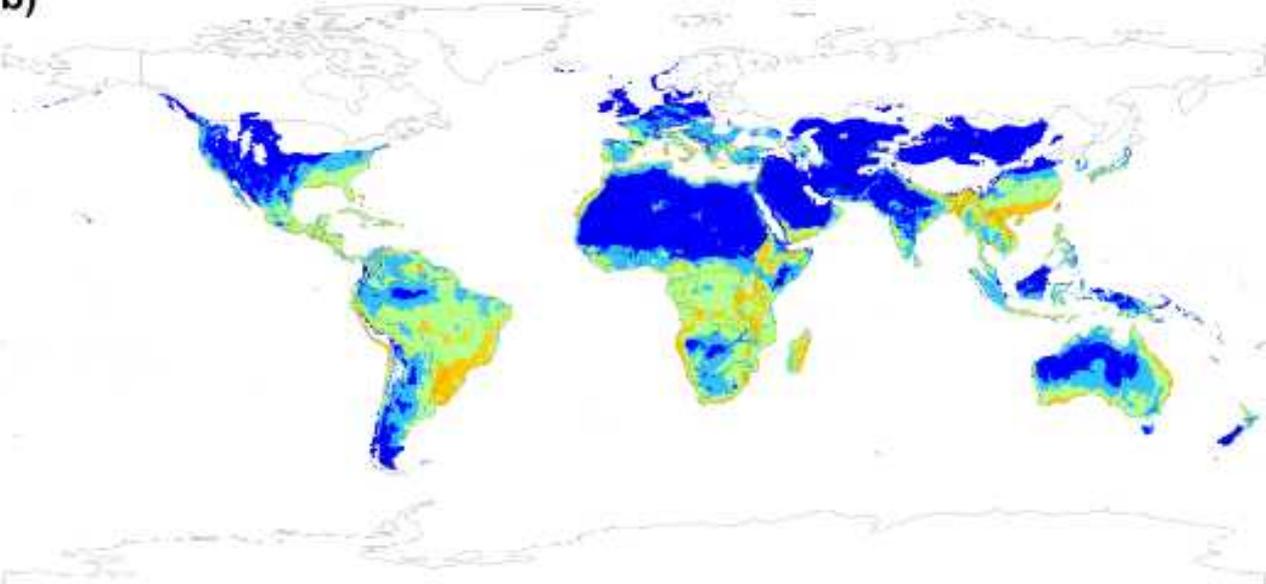
a)



Probabilités de présence



b)



Sources : Worlclim.org 5 arc-minutes resolution  
Koeppen-Geiger.vu-wien.act.at  
Système de coordonnées : GCS\_WGS\_1984



## Résumé

L'étude présentée dans ce rapport a deux objectifs principaux : l'estimation de la taille de population de deux espèces potentiellement invasives en région PACA (*Alternanthera philoxeroides* et *Eichhornia crassipes*) et l'évaluation de leur niche bioclimatique potentielle actuelle et future (2070s). Une vérification des observations passées et actuelles a été réalisée pour les deux espèces et un protocole de suivi diachronique a été lancé sur l'Ouvèze, à Sorgues, pour étudier l'étendue d'une population d'*A.philoxeroides*. Par ailleurs, la modélisation des niches bioclimatiques potentielles des deux espèces ont été effectuées avec le logiciel MaxEnt. Les cartographies montrent que les deux espèces ont déjà été observées plusieurs fois en PACA sans se maintenir pour *E.crassipes*. La modélisation montre une augmentation de la zone potentiellement favorable des deux espèces dans le futur en PACA. Deux espèces donc à surveiller et contrôler, à l'avenir, dans la région, afin de prévenir des risques sanitaires, écologiques et économiques qui leurs sont liés. Il est donc préconisé une sensibilisation des gestionnaires à ces nouvelles espèces, un arrachage manuel et un compostage tant que les populations sont restreintes.

Mot-clés : *Alternanthera philoxeroides* ; *Eichhornia crassipes* ; *Suivi diachronique* ; *Modélisation* ; *Surveillance*

The study presented in this report has two main objectives : to estimate the population size of two potentially invasive species in Provence Alpes Côtes d'Azur ( *Alternanthera philoxeroides* and *Eichhornia crassipes* ) and to assess their current and future potential bioclimatic niche ( 2070s ) . Checking of past and current observations has been realised for both species and a diachronic monitoring protocol has been started on Ouvèze at Sorgues to study extensive population of *A.philoxeroides* . Furthermore , modeling of bioclimatic potential niche of both species has been made with the software MaxEnt . Maps show that the two species have already been observed several times in PACA but *E.crassipes* doesn't persist. Modeling results show an increase in potential bioclimatic niche of both species in the future in PACA . Two species which have to be monitored in the future, in the region, to prevent health, environmental and economic risks related to them. therefore It is recommended sensitization of managers to these new species, manual lifting and composting as long as populations are limited.

Key-words : *Alternanthera philoxeroides* ; *Eichhornia crassipes* ; *diachronic protocol* ; *Modelling* ; *Monitoring*