

Analyse de l'efficacité d'un traitement par le sel pour lutter contre la prolifération de la Jussie *Ludwigia peploides* Kunth (Raven) en Camargue

Dandelot S., Ferretti S., Abou-Hamdan H.
Directeur d'étude : Pr. Cazaubon A.



Etude financée par le Parc naturel régional de Camargue

Laboratoire d'Ecologie des Eaux Continentales Méditerranéennes
Faculté des Sciences et Techniques Paul Cézanne
UNIVERSITE AIX-MARSEILLE III
Case C 31
13397 Marseille Cedex 20
Tel 04 91 28 84 33 – Fax 04 91 28 84 31
E-mail : arlette.cazaubon@univ.u-3mrs.fr

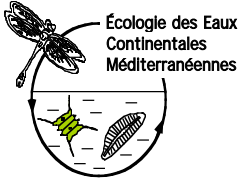
1. INTRODUCTION

1.1 La Jussie en France

Les hydrophytes amphibies à belles fleurs jaunes du genre *Ludwigia* (famille des Onagraceae), communément appelées « Jussie » en France, sont des macrophytes qui posent de sérieux problèmes écologiques et économiques, depuis une vingtaine d'années, sur notre territoire. Ces taxons, d'origine américaine, auraient été introduits volontairement, vers 1830 (cultures du « Jardin des Plantes de Montpellier » selon Berner, 1971) et selon toute évidence, accidentellement (Port Juvénal). Ainsi, à partir du Lez (Montpellier), on a constaté que la plupart des écosystèmes aquatiques du Sud de la France ont été successivement colonisés (Grillas *et al.*, 1992). Au cours du XX^{ème} siècle, son utilisation généralisée pour l'ornementation des aquariums et des plans d'eau a accéléré son expansion : le pourtour méditerranéen, toute la façade atlantique et quelques sites du centre et de l'est de la France (annexe 1). Son apparition récente dans le nord de la France (Dunkerque, Finistère) et sa persistance en moyenne altitude (Rhône) montrent sa capacité à coloniser l'ensemble du territoire français. Cette expansion ne semble donc pas terminée. De plus, une dizaine d'espèces ornementales du genre demeurent partout en vente libre. Au moins deux espèces de *Ludwigia*, en l'état de nos connaissances, sont présentes sur le territoire français. La première est diploïde ($2n = 16$) : *L. peploides* (Kunth) Raven subsp. *montevidensis* (Spreng.) et la seconde est décuploïde ($2n = 80$) : *L. grandiflora* (Michx.) Greuter & Burdet (1987) subsp. *hexapetala* (Hook. & Arn.) Nesom & Kartesz. La diploïde est principalement cantonnée sur le pourtour méditerranéen, alors que la polyploïde domine partout ailleurs. En région méditerranéenne, ces deux espèces sont présentes avec une dominance de *Ludwigia peploides*.

Les biotopes les plus favorables à leur développement sont des milieux lenticules mais elles peuvent résister à des courants vifs puisqu'elles se développent également en eaux courantes (Durance, Siagne, Rhône, Loire, Argens).

Les herbiers de Jussie engendrent de nombreuses nuisances, tant au niveau de la circulation de l'eau qu'au niveau de l'équilibre écologique des milieux touchés (Lebougre, 2001). Leur



Analyse de l'efficacité d'un traitement par le sel pour lutter contre la prolifération de la Jussie *Ludwigia peploides* Kunth (Raven) en Camargue

Dandelot S., Ferretti S., Abou-Hamdan H.
Directeur d'étude : Pr. Cazaubon A.



Etude financée par le Parc naturel régional de Camargue

Laboratoire d'Ecologie des Eaux Continentales Méditerranéennes
Faculté des Sciences et Techniques Paul Cézanne
UNIVERSITE AIX-MARSEILLE III
Case C 31
13397 Marseille Cedex 20
Tel 04 91 28 84 33 – Fax 04 91 28 84 31
E-mail : arlette.cazaubon@univ.u-3mrs.fr

développement se fait à partir des rives où elles s'implantent au ras de l'eau avant de s'enraciner sur les fonds vaseux.

La partie émergée leur permet d'effectuer la photosynthèse et la reproduction sexuée mais leur mode principal de reproduction semble être la multiplication végétative. Des morceaux de tiges arrachées peuvent, par bouturage, engendrer de nouveaux herbiers si les conditions d'implantation sont favorables. Leurs tiges sont cassantes, rigides, émergées ou immergées et peuvent dépasser 6m de longueur en fonction de la hauteur d'eau. Lors d'un assèchement assez long ou quand l'eau est prise en glace, elles peuvent survivre, sous forme prostrée mais ce mode de survie les affaiblit fortement.

Différents moyens de lutte sont utilisés pour réduire l'expansion de ces macrophytes tels que le traitement chimique et l'arrachage mécanique ou manuel. Il semblerait que ce dernier, plus minutieux, soit la méthode la plus efficace. Cependant les campagnes d'arrachage doivent être répétées et surtout porter sur de jeunes herbiers. De plus cette méthode n'éradique pas totalement les herbiers du fait de la difficulté d'enlever la totalité des parties végétales dans des zones où la hauteur d'eau est importante. Les traitements chimiques sont, actuellement, très utilisés et relativement efficaces, cependant ils sont toxiques pour des plantes non cibles, avec un risque majeur de provoquer des bouleversements de l'écosystème, via la dégradation bactérienne des plantes en décomposition. Ils s'appliquent sur les parties émergées du végétal par pulvérisation manuelle. Ce protocole évite ainsi que le produit soit dilué et dispersé par l'eau.

1.2 La Jussie en Camargue

La Camargue (aire alluvionnaire de 1400 Km²) est située à l'embouchure du Rhône. Elle est subdivisée en grande et petite Camargue (annexe 2). Cette vaste zone humide méditerranéenne est constituée de marais temporaires, d'étangs et de canaux d'irrigation amenant l'eau du Rhône pour les activités humaines. Ceci lui confère des caractéristiques physicochimiques particulières influencées, d'une part par les apports d'eau du Rhône, amenée par les canaux, et d'autre part, par la mer (proximité de la mer Méditerranée). Ainsi les zones humides de Camargue sont soumises à une pression de pollution issue des apports du Rhône et à une forte salinité issue de la mer.

Le climat de cette région joue un rôle primordial en conditionnant le milieu biologique et les cycles hydrologiques des mares (Buckwell P. 1997). La coupe géologique de la Camargue (annexe 3) montre une formation de cailloutis en profondeur sur lesquels sont déposés des sédiments d'origine marine recouverts en superficie par des sédiments d'origine fluviale, issus du Rhône (Ferrer A., 1996).

Le delta du Rhône héberge une grande variété d'espèces aviaires dont l'abondance varie avec les saisons. Cette région joue un rôle prépondérant dans le déroulement de la migration des oiseaux car elle constitue, de mars à août, un centre majeur de nidification, en particulier pour les oiseaux migrateurs. Ainsi la région camarguaise a depuis longtemps attiré les plus grands ornithologues qui ont ouvert les esprits sur la richesse de ces milieux humides et la nécessité de les protéger des impacts biologiques néfastes tels que ceux engendrés par les proliférations de Jussie. Ce sont également les associations de pêche, notamment l'AAPPMA et les fédérations de différents départements pour la pêche et la protection du milieu aquatique, qui ont permis de comprendre l'urgence d'une gestion de ces plantes invasives.

Dans les zones humides de la région méditerranéenne, deux espèces de Jussie connaissent une expansion considérable du fait de la modification de la gestion des marais par des apports massifs d'eau douce en été (Tamisier et Grillas, 1994). Ainsi la disparition de la période de stress hydrique estival et la désalinisation des sols peuvent constituer des facteurs favorisant le développement de la Jussie (Grillas *et al.*, 1992).

La date d'introduction de cette hydrophyte en Camargue est difficile à déterminer, aucun recensement n'ayant été effectué avant 1970. Actuellement deux espèces sont présentes : *Ludwigia peploides* subsp. *montevidensis* et *Ludwigia grandiflora* subsp. *hexapetala*. La première étant l'espèce dominante. Une cartographie de la distribution des espèces, réalisée par la Tour du Valat (annexe 1), montre que les marais et les canaux de Camargue sont colonisés par d'importants herbiers à *L. peploides* ; cette invasion proviendrait du Rhône. Les canaux et les roubines étant, tous, alimentés par le petit ou le grand Rhône, ces cours d'eau auraient apporté des fragments de Jussie qui se seraient fixés en Camargue puis auraient proliféré (Saes, 1996). Les interconnexions hydrauliques par les nombreux canaux d'irrigation auraient permis la propagation rapide de ces plantes aquatiques dans les marais.

L'expansion importante de ces herbiers entraîne de graves conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La prolifération de ces hydrophytes réduit

massivement la biodiversité (Grillas *et al.*, 1992) et génère un envasement accéléré de l'écosystème aquatique puisque les particules en suspension sont piégées dans les nombreuses racines immergées des herbiers. De ce fait, le faciès d'écoulement des eaux est fortement ralenti ; on observe fréquemment la fermeture complète du milieu. Cette réduction très forte de l'espace disponible dans le milieu entraîne, par le jeu de la compétition, la suppression des autres espèces aquatiques ou inhibe l'installation et le développement de nouvelles plantes. De plus, la présence de ces herbiers entraîne de fortes variations des paramètres physico-chimiques de l'eau. En été, une anoxie complète du milieu, liée à la biomasse importante des herbiers, engendre des conditions néfastes à la vie aquatique.

Enfin, de par ses caractéristiques de développement la Jussie provoque d'importantes nuisances pour les activités ludiques et piscicoles pratiquées dans certains plans d'eau.

2. BUT DE L'ETUDE

En région méditerranéenne, l'autoécologie des différentes espèces de Jussie est peu étudiée (Grillas *et al.*, 1992). L'analyse de leur stratégie de développement caractérisée par un très fort potentiel de compétition interspécifique et la prise en compte des relations intra-écosystémiques qui s'établissent avec la faune aquatique sont des facteurs fondamentaux à analyser avant la mise en place d'un moyen de lutte efficace contre ces invasions.

Cette étude, financée par le Parc de Camargue, vise à analyser l'efficacité d'un nouveau traitement (salage) sur la Jussie. Cette expérimentation doit maintenir l'équilibre écologique du site et lui conserver sa richesse patrimoniale. Ainsi un certain nombre de paramètres abiotiques et biotiques ont été suivis, au cours du temps (avant et après traitement), dans différents sites afin d'évaluer les éventuels impacts du sel sur les herbiers de *Ludwigia peploides* mais également, sur la physico-chimie de l'eau et sur la composition de la faune des macro-invertébrés associés aux herbiers. Il s'agit donc de tester l'influence de cette méthode de lutte sur le fonctionnement naturel des écosystèmes aquatiques étudiés.

L'originalité de cette étude consiste dans l'utilisation, pour la première fois, d'un produit de traitement naturellement présent en Camargue : le sel. Du fait de la formation géologique du delta du Rhône et du fonctionnement des nappes alluviales, il se produit fréquemment des

remontées de sel (annexe 3). La salinité est donc un facteur environnemental naturel dans les eaux et sédiments de ces zones humides (Ferrer, 1996 ; Chosson, 1999). Ainsi ces biotopes abritent des espèces végétales indigènes euryhalines dont le développement est corrélé à des facteurs environnementaux tels que la salinité et la durée de mise en eau des parcelles (Grillas et Lefoeuvre, 1992). C'est pourquoi, le traitement par le sel des herbiers de Jussie, s'il s'avèrait efficace, perturberait beaucoup moins le milieu naturel qu'un traitement par herbicide(s), par exemple. De plus, le choix du sel, produit en Camargue aux Salins de Giraud, a été argumenté par le fait que si la Jussie tolère un certain taux de salinité (on la retrouve à l'estuaire du Rhône, dans le site de la Palissade) elle ne supporte pas des teneurs en sels trop élevées puisqu'elle n'a pas été trouvée dans le milieu marin.

D'après Mesleard et Perennou en 1996, la Jussie supporterait au maximum une teneur en sel de 10 g.l^{-1} .

Par conséquent, le sel pourrait constituer, en Camargue, un moyen de lutte efficace contre l'invasion de cette hydrophyte, tout en perturbant, le moins possible, l'écosystème.

3. SITES ET CAMPAGNES D'ETUDE

Les résultats de cette étude portent sur quatre campagnes de prélèvements, effectuées en juillet et en septembre 2003 et en avril et mai 2004.

Pour tester ce traitement, nous avons déterminé trois sites distincts par leur emplacement et leur durée de mise en eau. Ces sites d'étude se trouvent dans le secteur de la grande Camargue, délimité par le Grand Rhône, du côté oriental et le petit Rhône, du côté occidental (Figure 1). D'un point de vue géomorphologique, ces stations se situent en moyenne Camargue, région caractérisée par un large gradient de salinité (Chosson, 1999) (annexe 4). Chacun des sites est divisé en deux parcelles de 30 m^2 chacune : une parcelle de référence (ne subissant aucun traitement) et une parcelle dans laquelle est pratiqué un apport de sel.

Le premier site (indiqué « Marais » sur la carte) est, comme son nom l'indique, un marais, situé au sud-ouest de la ville de Villeneuve, à environ 2 km de l'étang de Vaccarès appartenant au parc régional de Camargue. Ce site était immergé dans 10 à 20 cm d'eau, lors de notre campagne de prélèvements de juillet alors qu'en septembre, il était complètement asséché. En avril et mai 2004 la profondeur d'eau était d'environ 15 cm. La parcelle témoin et la parcelle traitée par du sel sont distantes de 50 m environ.

Le deuxième site est un canal d'irrigation appelé « roubine ». Il se localise sur une propriété privée (domaine du Mas de Cure), à environ 6 km à l'ouest de l'étang de Vaccarès et à 1 km au sud-est du château d'Avignon. Cette station est constamment en eau. En juillet, la hauteur d'eau était de 50 à 60 cm alors qu'elle était d'1 m, en septembre. En avril et mai 2004, la profondeur était de 50 à 60 cm. Les deux parcelles (témoin, en amont et salée, en aval) sont distantes d'environ 100 m.

Le dernier site est un étang, localisé à 300 m au nord-est de la roubine. En juillet et en septembre, cet étang était totalement à sec mais la Jussie était tout de même présente malgré l'exondation. En avril et mai 2004, l'étang était en eau (30 cm environ). La hauteur d'eau était d'environ 30 cm. La parcelle de référence et la parcelle salée sont proches, distantes de seulement 2 m.



Figure 1 : Localisation des sites prospectés (croix rouge sur la carte)

4. MATERIEL ET METHODE

4.1 *Le salage*

Nous avons réparti, de façon homogène, 25 Kg de gros sel, sur chacune des trois parcelles traitées dans chacun des sites étudiés, (photo n°1). Nous avons également pulvérisé 2 litres de saumure sur les parties aériennes des végétaux. (Photo n° 2)

4.2 *La physico-chimie de l'eau*

En juillet, nous avons prélevé de l'eau, au sein des 2 parcelles (témoin et salée) du marais et en amont des 2 parcelles de la roubine, l'étang étant exondé, en vue d'analyser la qualité de l'eau.

En septembre, les études physicochimiques n'ont pu être effectuées que pour les parcelles témoin et salée de la roubine, seul biotope encore en eau.

En avril et mai 2004, les analyses de la qualité de l'eau ont été réalisées dans les 2 parcelles du marais et de la roubine. Les parcelles de l'étang ayant été dévastées par les inondations de février 2004 et les herbiers arrachés, de ce fait, les études de biomasse n'ont pu être effectuées.

Le protocole des analyses physicochimiques est celui des normes préconisées par l'Agence de l'Eau : SEQ eau (Oudin et Maupas, 1999).

La température est mesurée, in situ, grâce à une sonde (WTV)

Le pH est évalué, dès le retour au laboratoire, avec un pH mètre (Metrohm) équipé d'une sonde au calomel (KCl) saturé.

Les matières en suspension sont récupérées par filtration d'un litre d'eau sur filtre Watman GF/C (0.45 µm). La perte au feu permet, par différence, d'évaluer les fractions organiques et minérales exprimées en mg.l⁻¹.

Les matières organiques dissoutes traduisent l'oxydabilité ou mesure de l'oxygène consommé par les matières organiques dissoutes. Elles ont été mesurées par manganimétrie, à froid, en milieu acide. Les résultats sont exprimés en mg.l^{-1} .

L'alcalinité est déterminée par dosage volumétrique à l'acide chlorhydrique, en présence d'un indicateur coloré. Elle permet d'évaluer la concentration en bicarbonates. Les résultats sont exprimés en mg.l^{-1} de HCO_3^- .

Le calcium est dosé par complexométrie à l'EDTA et par utilisation de la murexide, comme indicateur coloré. Les valeurs sont exprimées en mg.l^{-1} .

Le magnésium est évalué en faisant la différence entre la valeur $[\text{Ca} + \text{Mg}]$ dosée à l'EDTA en présence d'érichrome noir T et la teneur en Ca, ce qui correspond à la teneur en magnésium exprimée en mg.l^{-1} .

Les chlorures sont dosés par la méthode au nitrate mercurique (méthode de Schales). Les résultats sont exprimés en mg.l^{-1} .

Les sulfates sont dosés par gravimétrie, sous forme de sulfate de baryum. Ils sont donnés en mg.l^{-1} de SO_4^{2-} .

Les substances azotées sont dosées au TECHNICON (auto-analyseur).

- Les nitrites (NO_2^- en mg.l^{-1}) sont dosés par diazotation de la sulfamide en milieu acide et sa réaction avec la N.Naphtyl-éthylènediamine.
- Les nitrates (NO_3^- en mg.l^{-1}) sont dosés par réduction des nitrates en nitrites sur une colonne Cadmium-Cuivre.
- L'azote ammoniacal (NH_4^+ en mg.l^{-1}) est dosé par la méthode dite « au bleu d'indophénol ».

Les orthophosphates sont dosés par la méthode de Deniges et Atkins après filtration sur filtre millipore $0.45 \mu\text{m}$. En milieu acide, les orthophosphates forment avec le molybdate d'ammonium un complexe phosphomolybdique qui est réduit en « bleu de molybdène » par l'acide ascorbique, en présence d'oxytartrate de potassium et d'ammonium. Les résultats sont exprimés en mg.l^{-1} de PO_4^{3-} .

La **DBO5** mesure la quantité d'oxygène dissous consommée dans le milieu naturel par les micro-organismes aérobies qui assurent la décomposition, par oxydation, des matières organiques contenues dans l'eau, et ce, pendant 5 jours à 20°C (méthode Winkler). Les données sont exprimées en $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ de O_2 .

4.3 Les macrophytes

Pour évaluer la biomasse des herbiers de Jussie, cinq quadrats de 50 cm de côté ont été placés, au hasard, sur chaque parcelle, selon la méthode proposée par le GIS Macrophytes. (Photos n°4). La totalité des végétaux de chaque quadrat a été récoltée et placée dans des sacs en plastique puis stockée dans un réfrigérateur dans l'attente d'être nettoyée, triée et pesée. Après avoir nettoyé les végétaux, les différentes parties (racines, tiges, feuilles et fruits) sont séparées et placées dans une étuve à 70°C ce qui permet la dessiccation des matières organiques sans dégradation de l'azote. Cette manipulation de nettoyage et de tri se fait, en une semaine environ, pour la totalité des stations, à raison d'une demi-journée, voire une journée de manipulations, par station. Plusieurs pesées sont effectuées tous les jours jusqu'à l'obtention d'un poids constant (généralement, au bout de 3 jours environ). La biomasse des herbiers de chaque station peut alors être évaluée en $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ de matière sèche.

4.4 Les macro-invertébrés benthiques

Dès le retour au laboratoire, les plantes ont été mises à tremper dans des bassines dont l'eau a été filtrée à travers un filet (maille de 70 μm). La vase et les résidus de végétaux ont été triés afin de récolter et de déterminer l'ensemble des invertébrés contenus dans chacun des quadrats.



Photo 1 : Salage au gros sel de la station du marais, en avril 2004



Photo 2 : Pulvérisation de la saumure sur les parties émergées des plantes de la Roubine, en juillet 2003



Photo 3 : Séchage à l'air libre des Jussies triées et nettoyées, avant le passage à l'étuve



Photo 4 : Prélèvement des Jussies dans la roubine, en mai 2004

5. RESULTATS ET INTERPRETATION

Le premier traitement par salage a été effectué, en juillet, aussitôt après les prélèvements sur les parcelles. La campagne de septembre a donc permis de comparer l'action du sel sur les paramètres abiotiques et biotiques, entre les parcelles témoins et les parcelles salées des différentes stations. Un deuxième salage a été réalisé en avril après les prélèvements afin de comparer cette méthode à deux périodes du cycle de développement de la Jussie : en été, au moment où sa croissance est maximale et au printemps, lorsqu'elle se trouve en rosette à la surface de l'eau. Les résultats, présentés dans ce rapport, portent sur les variations de biomasses des différents herbiers, la composition en macro-invertébrés et les valeurs des paramètres physico-chimiques de l'eau. Le seul milieu en eau, lors des quatre campagnes (juillet et septembre 2003, avril et mai 2004) étant la roubine, les résultats commentés pour l'analyse physico-chimique de l'eau concernent uniquement ce site (Figure 2).

5.1 Qualité de l'eau

Les résultats des analyses physico-chimiques, réalisées dans la roubine, au cours des 4 campagnes (juillet et septembre 2003; avril et mai 2004), sont présentés dans le tableau 1 et la figure 2.

Nous avons tenté de donner une estimation de la qualité de l'eau, pour la roubine qui s'apparente à un cours d'eau à vitesse de courant faible et ce, à partir de méthodes testées et retenues pour les cours d'eau, c'est-à-dire sur les classes proposées par l'Agence de l'Eau (SEQ eau, 1999).

Les valeurs de pH des deux parcelles définissent la même situation d'acidité faible voire d'une neutralité approchée entre juillet et septembre 2003. Ceci pourrait indiquer que le salage n'a pas d'influence sur le pH des eaux traitées. Le pH, légèrement acide, en avril 2004, augmente, en mai 2004, de la même manière, dans les deux parcelles.

Les teneurs en chlorures (Cl⁻) sont élevées sur le site, dès le mois de juillet 2003 (135 mg.l⁻¹) et correspondent à une eau plus ou moins polluée. En septembre, la concentration augmente mais avec des teneurs plus faibles dans la parcelle salée que dans la parcelle témoin. On note

également une augmentation des chlorures avec, en mai 2004, avec, dans ce cas, des teneurs supérieures dans la parcelle salée (674 mg.l^{-1}) que dans la parcelle témoin (177 mg.l^{-1}).

Les concentrations en calcium (Ca^{2+}) sont importantes en juillet 2003 (136 mg.l^{-1}) ce qui indique une minéralisation importante (eaux dures à très dures). En septembre, les teneurs en ions calcium augmentent, surtout dans la parcelle (respectivement 260 dans la parcelle salée et 212 mg.l^{-1} dans le témoin). En avril et en mai 2004, les concentrations en calcium diminuent dans les deux parcelles ; elles s'échelonnent entre 52 mg.l^{-1} et 92 mg.l^{-1} , en mai.

Les concentrations en magnésium (Mg^{2+}) sont faibles en juillet 2003 (5 mg.l^{-1}) alors qu'elles sont fortes, pour les deux parcelles, en septembre. Cependant, les teneurs sont plus fortes au niveau de la parcelle salée (63 mg.l^{-1}) que dans la parcelle témoin (29 mg.l^{-1}). En avril et mai 2004, les teneurs en magnésium sont élevées surtout dans la parcelle salée en mai (63 mg.l^{-1})

Les sulfates (SO_4^{2-}) sont en assez fortes concentrations, en juillet 2003 (77 mg.l^{-1}), ce qui traduit une eau plus ou moins séléniteuse ou polluée avant le traitement. En septembre 2003, la parcelle salée montre des teneurs beaucoup plus élevées (82 mg.l^{-1}) que la parcelle témoin (36 mg.l^{-1}). Le sel influencerait donc la concentration en sulfates des eaux. En avril 2004, les teneurs en sulfates sont assez faibles dans les deux parcelles (42 mg.l^{-1} pour la parcelle témoin et 65 mg.l^{-1} pour la parcelle salée). En mai 2004, les sulfates augmentent de façon importante dans la parcelle salée (135 mg.l^{-1}) ce qui corrobore l'effet du sel sur la teneur en sulfate.

La concentration en sels d'azote (NO_2^- et NO_3^-) est importante, en juillet 2003, avec des teneurs en NO_2^- de 0.045 mg.l^{-1} et en NO_3^- de 2.9 mg.l^{-1} ce qui correspond à des eaux subissant une pollution insidieuse ou sensible. En septembre 2003, ces valeurs chutent au sein des deux parcelles (NO_2^- proche de 0.015 mg.l^{-1} et $\text{NO}_3^- < 0.1 \text{ mg.l}^{-1}$). En avril 2004, les teneurs en NO_3^- des deux parcelles (2.1 mg.l^{-1}) sont fortes, les eaux subissent donc une pollution insidieuse ou sensible, comme en juillet 2003. En mai 2004, dans les deux parcelles, les teneurs en nitrates (0.1 mg.l^{-1}) comme celles des nitrites (0.01 mg.l^{-1}) chutent.

La quantité de phosphates inorganiques (PO_4^{3-}) diminue légèrement, entre juillet et septembre 2003, dans les deux parcelles (référence et salée). Les eaux sont peu productives dans le site de la roubine et cette tendance n'évolue pas, avant et après le salage, (0.03 mg.l^{-1})

en juillet et 0.02 mg.l^{-1} en septembre pour les deux parcelles). Il en est de même, en avril et en mai 2004, où les teneurs en phosphates inorganiques restent stables à 0.01 mg.l^{-1} .

La concentration en oxygène dissous (O_2) diminue en septembre 2003 dans les eaux de la roubine ce qui traduit une perturbation du milieu, à cette période. La qualité de l'eau évolue d'une situation perturbée, en juillet 2003 (5.3 mg.l^{-1}), à une situation critique en septembre 2003 (3.2 mg.l^{-1}) dans les deux parcelles. L'oxygénation des eaux est forte et identique dans les deux parcelles en avril (11.5 mg.l^{-1}) et en mai (10.2 mg.l^{-1}) ce qui correspond à une bonne qualité d'eau.

La quantité de matières en suspension minérales (MES min) est plus importante dans la parcelle salée avec une valeur de 11 mg.l^{-1} alors que la parcelle témoin a une valeur de 7.1 mg.l^{-1} . Le salage pourrait donc augmenter la quantité de matières en suspension dans l'eau en dégradant les parties végétales traitées de la Jussie par de la saumure. En avril 2004, la quantité de matières en suspension minérales augmente de façon importante dans la parcelle salée (31.6 mg.l^{-1}) et chute, en mai 2004, avec une valeur de 6.6 mg.l^{-1} . Dans la parcelle témoin elle augmente, en mai 2004, avec une valeur de 18.4 mg.l^{-1} .

La quantité de matières en suspension organiques (MES org) augmente en septembre 2003 (3.6 mg.l^{-1}), dans les deux parcelles ainsi que dans la période d'avril à mai 2004, mais de façon plus importante, dans la parcelle non salée (8.4 mg.l^{-1}).

La quantité de matières organiques dissoutes (MODF) est à peu près stable dans la parcelle salée, pour les campagnes de juillet et septembre 2003, et d'avril 2004 (2 mg.l^{-1}) ; en revanche elle augmente légèrement en mai 2004 (3.2 mg.l^{-1}). Dans la parcelle témoin on remarque une augmentation brutale, en mai 2004, avec une valeur de 7.4 mg.l^{-1} .

JUILLET 2003

Stations	Temp.	Cond.	pH	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻ inorg	HCO ₃ ⁻	O ₂	DBO5	MODF	M.E.S min	M.E.S org
	°C	µS.cm ⁻¹	Unité	mg.L ⁻¹													
Roubine témoin			7.1	135	136	5	77	0.045	2.9	0.1	0.035	85	5.3		1.8	8.6	0
Roubine salée			7.1	135	136	5	77	0.045	2.9	0.1	0.035	85	5.3		1.8	8.6	0

SEPTEMBRE 2003

Stations	Temp.	Cond.	pH	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻ inorg	HCO ₃ ⁻	O ₂	DBO5	MODF	M.E.S min	M.E.S org
	°C	µS.cm ⁻¹	Unité	mg.L ⁻¹													
Roubine témoin			7	249	212	29	36	0.017	0.1	0.1	0.031	95	3.2	3.2	1.4	7.1	3.6
Roubine salée			7	177	260	63	82	0.014	0.1	0.1	0.02	95	3.2	1.4	2.2	11	3.4

AVRIL 2004

Stations	Temp.	Cond.	pH	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻ inorg	HCO ₃ ⁻	O ₂	DBO5	MODF	M.E.S min	M.E.S org
	°C	µS.cm ⁻¹	Unité	mg.L ⁻¹													
Roubine témoin	16.5		6.4	213	52	27	42	0.032	2.1	<0,1	<0,01	99	11.7	3.6	0.8	9.6	2.9
Roubine salée	16.4		6.3	177	72	43	65	0.026	2.1	<0,1	<0,01	99	11.5	4.9	1.8	31.6	4.3

MAI 2004

Stations	Temp.	Cond.	pH	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻ inorg	HCO ₃ ⁻	O ₂	DBO5	MODF	M.E.S min	M.E.S org
	°C	µS.cm ⁻¹	Unité	mg.L ⁻¹													
Roubine témoin	16.5	720	7.8	177	52	32	135	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	115	10.2	>10,2	7.4	18.4	8.4
Roubine salée	16.4	645	7.65	674	92	63	46	<0,01	<0,1	<0,1	<0,01	112	10.2	>10,2	3.2	6.6	5.2

Tableau 1 : Résultats bruts des analyses physicochimiques de l'eau de la roubine lors des quatre campagnes de prélèvements.

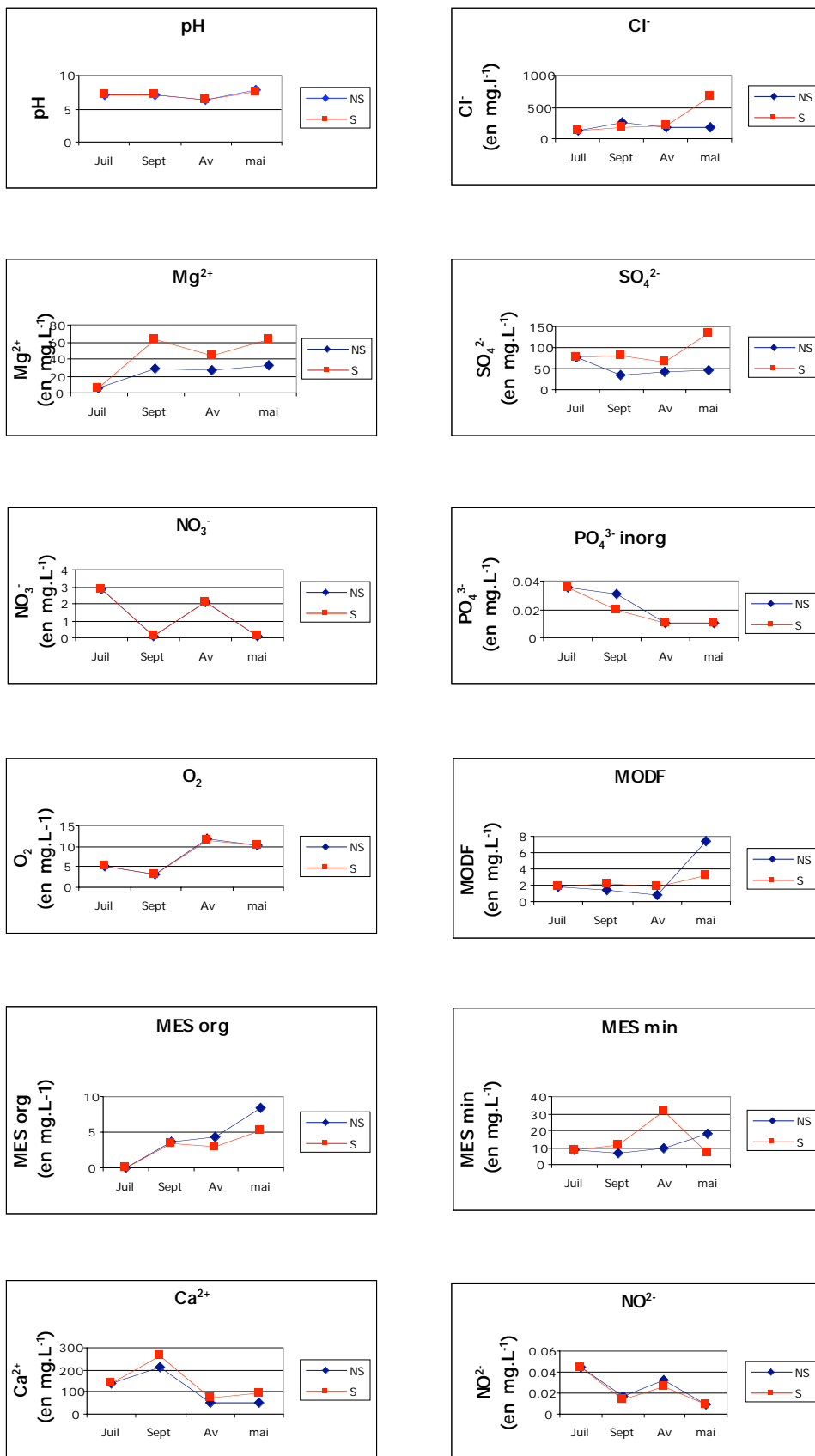


Figure 2 : Variations de quelques paramètres physicochimiques dans les parcelles salées (S) et non salées (NS) de la roubine au cours des quatre campagnes de prélèvement

5.2 Développement des herbiers

Les valeurs des biomasses moyennes des différents herbiers étudiés en 2003 et 2004 varient fortement (Figure 3) avec des valeurs comprises entre 161 g.m⁻² pour la parcelle témoin de l'étang (juillet 2003) et 939 g.m⁻², pour la parcelle témoin de la roubine (septembre 2003). Globalement, les biomasses de tous les herbiers augmentent, de juillet à septembre 2003, avec cependant certaines différences entre les parcelles traitées et non traitées.

En avril et mai 2004, les prélèvements ont été uniquement réalisés, dans le marais et la roubine, les piquets de délimitation des deux parcelles de l'étang, ayant été arrachés par les crues de février et mars 2004.

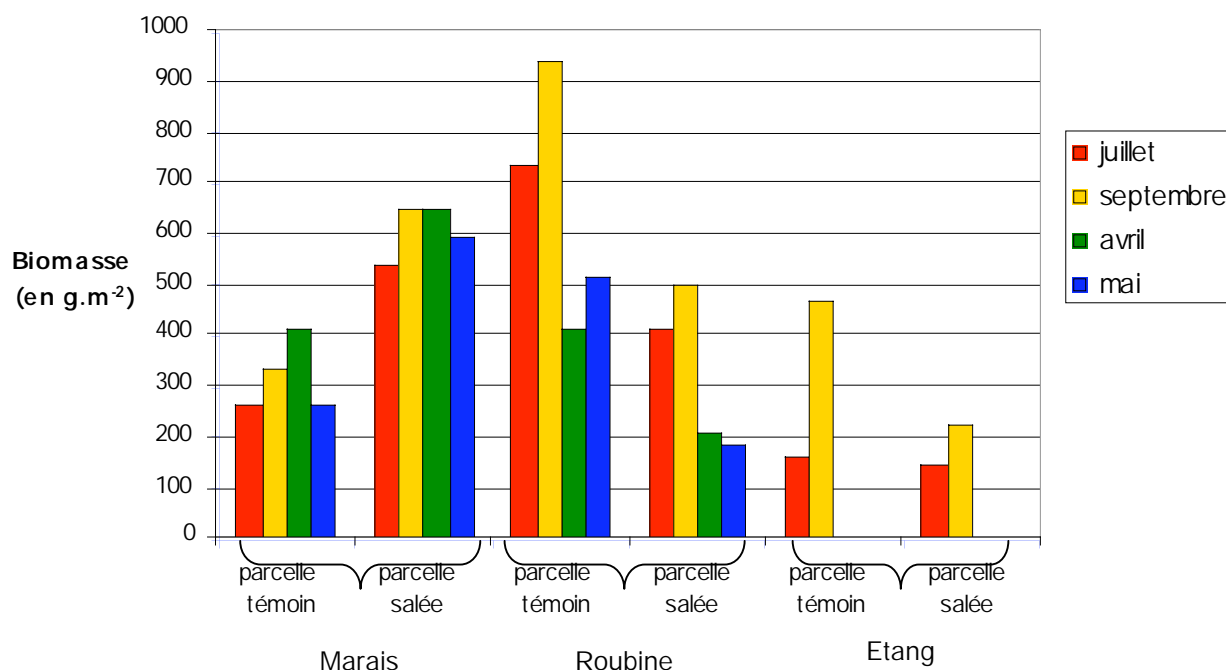


Figure 3 : Comparaison des biomasses moyennes (en g.m⁻²) des herbiers de *Ludwigia peploides* prospectés en juillet et septembre 2003 et en avril et mai 2004



Photo n°5 : Station témoin du marais
(juillet 2003)



Photo n°6 : Station témoin du marais
(septembre 2003)



Photo n°7 : Station salée du marais (juillet 2003)



Photo n°8 : Station salée du marais
(septembre 2003)



Photo n°9 : Jeunes pousses de Jussies dans la parcelle non salée du marais (mai 2004)



Photo n°10 : Station traitée de la roubine (septembre 2003)



Photo n° 11 : Station traitée de la roubine, herbier de Jussies en gros plan (septembre 2003)



Photo n°12 : Stations témoin et traitée de l'étang (juillet 2003)



Photo n°13 : Stations témoin et salée de l'étang (septembre 2003)



Photo n°14 : Peuplement de Jussies, de Characées et de Scirpes dans la station de l'étang (mai 2004)

Dans le marais, lors de notre campagne de juillet, la hauteur d'eau atteignait 10 à 20 cm dans la parcelle de référence et la végétation se composait essentiellement de Jussies dont la biomasse moyenne est de 264 g.m^{-2} (Photo n° 5). En septembre, les herbiers de Jussies étaient plus développés qu'en juillet (338 g.m^{-2}) soit une augmentation de 1.3 fois (Photo n°6). La station traitée de ce site a subi également un accroissement de sa biomasse mais moindre que dans la parcelle témoin (x1.2).

En effet, la taille des herbiers a augmenté légèrement en septembre avec une valeur de 648 g.m^{-2} (en juillet, biomasse : 545 g.m^{-2}). Les feuilles des plantes étaient très abîmées soit à cause de l'effet corrosif direct du sel, soit par le broutage (les végétaux étant moins vigoureux après traitement).

En outre, lors de notre première campagne, la végétation était dominée par la Jussie alors qu'en septembre, d'autres végétaux se sont développés dans cette parcelle.

La biomasse diminue dans les deux parcelles au printemps, mais de manière moindre dans la parcelle salée. Lors de la sortie de terrain nous avons pu remarquer qu'en avril 2004, les deux parcelles étaient colonisées par une quantité importante de végétaux morts alors qu'en mai, la Jussie apparaissait sous forme de jeunes pousses issues de la germination de graines enfouies dans le sol (Photo n° 9).

Le site de la roubine était immergé dans une eau assez profonde, en juillet comme en septembre. C'est la station la plus productive avec la biomasse maximale en 2003, dans la parcelle témoin, pour les deux campagnes effectuées (734.8 g.m^{-2} , en juillet et 938.9 g.m^{-2} , en septembre), soit une augmentation de biomasse de 1.3 fois.

En juillet, la station salée est colonisée par un herbier bien développé de Jussie (418 g.m^{-2}). En septembre, la biomasse de cet herbier augmente peu avec une biomasse de 505 g.m^{-2} (soit x1.2) (Photo n° 10). De plus, les plantes se présentaient sous la forme de rosettes de feuilles à la surface de l'eau, les parties émergées ayant disparu sans doute sous l'action de la saumure (Photo n°11).

En avril 2004, c'est toujours dans la parcelle témoin que la Jussie était plus développée (avec une biomasse de 417 g.m^{-2} alors qu'elle n'était que de 212.7 g.m^{-2} , dans la parcelle salée). En mai 2004, on constate toujours une augmentation de la biomasse (519.4 g.m^{-2}) alors qu'elle a diminué dans la parcelle salée (183.7 g.m^{-2}).

Le sel aurait eu un effet inhibiteur sur les herbiers de ce site mais la quantité importante de litière dans la parcelle témoin pourrait entraîner une surestimation des biomasses dans la parcelle témoin de la roubine.

Dans l'étang, malgré l'assèchement des deux parcelles, en été, la Jussie continue à se développer. En juillet, les végétaux, à l'état rampant, présentent des biomasses moyennes de 161.2 g.m^{-2} pour la station de référence et de 145.9 g.m^{-2} pour la station traitée. En septembre, la biomasse a triplé dans la parcelle témoin (470.1 g.m^{-2}) tandis que dans la parcelle traitée, cette augmentation est moins importante ($\times 1.6$) soit 228.2 g.m^{-2} (Photos n°12 et n°13). Le ralentissement de croissance de cet herbier pourrait s'expliquer par la forte canicule qui a sévi durant l'été 2003, l'assèchement permanent du site pendant cette période et l'effet du sel. En effet le cumul de ces perturbations a pu avoir un impact plus notable sur l'herbier de la parcelle salée dont la croissance a été deux fois moins importante que dans celle de la parcelle non traitée.

En avril et en mai 2004, nous n'avons pas retrouvé les délimitations des parcelles dans le site de l'étang. En avril, la Jussie était peu présente dans tout l'étang. En mai la situation avait un peu évolué. Nous avons remarqué que la Jussie était présente, en mélange avec de nombreux végétaux immergés tels que des Myriophylles, des Renoncules, des Characées et des Scirpes (photo n°14).

5.3 Communautés de macro-invertébrés

La composition faunistique en macro-invertébrés peut être une indication écosystémique complémentaire ainsi qu'un complément d'information pour évaluer la qualité biologique des cours d'eau. Le tableau 2 rend compte de la richesse taxinomique de la macro-faune représentée au sein des herbiers.

FAMILLES	Roubine NS				Roubine S			
	juil-03	sept-03	avr-04	mai-04	juil-03	sept-03	avr-04	mai-04
ACHETES			2	4			1	2
OLIGOCHETES	20	29	253	122	9	12	71	168
CRUSTACES								
Anostracés				10				4
GASTEROPODES								
Ferrissidae			5					2
Physidae		1	1	2		1	1	
INSECTES								
Lestidae								4
Haliplidae		2	1					
Ceratopogonidae			4	22		6	4	27
Chironomidae			34	224	3		26	313
Culicidae				2				
Dixidae				2				
Simulidae			2			1	2	
Elmidae								1
Thaumaleidae			1					1
Baetidae		1						
Caenidae					1			
Leptophlebiidae	2							
Plécoptères		3						

Tableau 2 : Répartition des organismes appartenant aux différentes familles de macro-invertébrés dans les parcelles témoin (NS) et salée (S) de la roubine lors de nos quatre campagnes de prélèvements.

6. DISCUSSION

Les premiers résultats obtenus permettent d'établir certaines perspectives sur l'évolution de la croissance des végétaux et de la qualité des écosystèmes après traitement des herbiers aquatiques par le sel. Les campagnes de juillet 2003 et d'avril 2004 correspondent à des dates de situations de référence pour les analyses physicochimiques puisque les prélèvements d'eaux sont antérieurs au salage. Il s'agit d'un état généralisé de pollution, plus ou moins élevée, à ces périodes, dans le site de la roubine (canal d'irrigation). Mais l'origine de cette pollution varie au cours du temps; les concentrations importantes en nitrates, en juillet 2003, sont probablement dues à la mise en eau des marais et des étangs, durant l'été. Par contre, en avril 2004, la concentration importante en nitrates résulterait d'une perturbation naturelle : les inondations fréquentes, en février et mars, qui ont pu drainer les substances azotées des zones d'activités agricoles. En effet, De Groot et Golterman, en 1999, indiquent que d'importantes quantités de phosphates et de nitrates peuvent entrer dans les marais et étangs de l'hydrosystème Vaccarès via les canaux de drainage et d'irrigation.

De manière générale, le salage modifie peu la qualité physicochimique des milieux, ce dont témoigne l'analyse comparative des variations des paramètres, dans la parcelle témoin et la parcelle salée. Cependant, on constate une augmentation des teneurs en sulfates et en matières en suspension minérales, dans les deux parcelles de ce site.

L'augmentation des concentrations en sulfates, entre avril et mai 2004, dans la parcelle salée de la roubine est sans doute due à un effet indirect du salage qui aurait affaibli les (réduction de la biomasse), en mai. Cette destruction des végétaux provoque une augmentation des matières organiques mortes dans le milieu qui sont dégradées par des bactéries aérobies entraînant une consommation d'oxygène dissous pour leur métabolisme. Quand une anoxie s'installe, les bactéries anaérobies du sédiment remontent dans la colonne d'eau afin de consommer les matières organiques en produisant des composés soufrés. C'est ce qui s'est vraisemblablement produit, en témoigne la couleur noirâtre du sédiment dans la roubine, indication de la présence de bactéries anaérobies.

Les différences de concentrations en matières en suspension, entre la parcelle salée et la parcelle témoin, peut être due au fait que celle-ci, plus chargée en matières en suspension, est située sur une zone d'accumulation des sédiments dans la roubine moins profonde que la parcelle salée.

Les fortes concentrations en nitrates, en été (juillet 2003), chutent en septembre, en corrélation avec le fort développement des herbiers ; cette évolution traduit la forte consommation des sels nutritifs (utilisés pour la nutrition des végétaux) et plus particulièrement, des substances azotées. En effet, Rejmankova, en 1992, indique que la croissance de la Jussie augmente de manière asymptotique avec l'augmentation des nitrates dans l'eau.

Par contre, la chute printanière, entre avril et mai 2004, des concentrations en nitrates, n'est pas liée à la croissance de la Jussie puisque les biomasses ont diminué à cette période, dans la parcelle salée, le printemps correspondant à une période de latence des *Ludwigia*.

En été la légère diminution des concentrations en orthophosphates, dans les deux parcelles de la roubine, correspond à l'accroissement en parallèle de la biomasse dans cette station. En effet, le développement de la Jussie a entraîné la consommation des phosphates inorganiques par ces plantes. Durant le printemps, l'augmentation des matières en suspension organiques et minérales et des matières organiques dissoutes, dans la parcelle témoin, résulte probablement des particularités géomorphologiques de cette parcelle qui pourrait concentrer certains éléments de manière plus importante que la parcelle salée.

Un développement important des herbiers, en été, peut modifier la qualité des eaux, notamment réduire fortement la concentration en oxygène (Lebougne, 2001). C'est ce qui a été observé, en juillet et en septembre, période de développement maximum des herbiers.

Par ailleurs, de fortes concentrations en sel semblent affaiblir les plantes et diminuer leur caractère compétiteur vis-à-vis d'autres macrophytes aquatiques. Dans les parcelles salées, on constate, sur l'ensemble des sites étudiés, un ralentissement du développement des herbiers, de juillet à septembre, par rapport aux parcelles de référence. Ce retard de croissance reste faible dans les milieux aquatiques permanents ; néanmoins, après traitement, la Jussie a présenté, en septembre 2003, un aspect foliaire en rosettes qui correspond à un état de latence, stade de développement qui ne se manifeste, généralement, qu'au printemps. Par ailleurs, le salage pratiqué sur des parcelles plus ou moins asséchées (pour les sites du marais et de l'étang) a eu une action inhibitrice sur les herbiers et rendu ainsi les plantes plus vulnérables vis-à-vis des herbivores et moins compétitrices.

Le caractère imprévisible et changeant des mares temporaires de Camargue, marqué par leur assèchement fréquent accompagné d'une salinité élevée, en été, favorise le maintien de la biodiversité végétale des zones humides méditerranéennes (Grillas et Lefeuvre, 1992 ; Tamisier et Grillas, 1994 ; Bonis, 1993). Or la gestion de ces milieux qui s'appuie sur le

contrôle du régime hydrique et de la salinité, contribue à une banalisation des communautés de macrophytes submergées (Grillas P., Lefeuvre J.-C., 1992). La Jussie est favorisée par la disparition de la période de stress hydrique estival et par la diminution de la salinité engendrée (Grillas *et al.*, 1992) et peut ainsi proliférer en Camargue.

Le sel a un effet corrosif sur les feuilles, notamment quand il est appliqué sur des herbiers se développant dans des parcelles asséchées. Il faut noter la difficulté rencontrée lors des analyses de biomasse des six herbiers étudiés. Les importants écarts de valeurs entre les différents quadrats pourraient trouver une explication dans le fait que, sur le terrain, la rigueur des prélèvements est difficile à maintenir dans certains cas, du fait de:

- la hauteur d'eau importante dans certains milieux
- la présence d'une importante litière notamment dans la parcelle salée de la Roubine
- la prise en compte de tissus végétaux morts et non encore décomposés. (situation rencontrée en septembre 2003)

Le salage ne semble pas avoir d'effet sur les communautés de macro-invertébrés benthiques associés aux herbiers dans la roubine. Les familles d'invertébrés, présentes, lors des quatre campagnes, sont majoritairement des décomposeurs dans les parcelles salées et témoins, que ce soit avant ou après le salage. Ceci indique que ce canal contient initialement une grande quantité de matières organiques caractéristique éthologique capitale pour ce type d'organismes. Le sel, en dégradant les matières végétales, accentue cette situation sans avoir d'effet significatif sur la macrofaune.

7. CONCLUSION

Si l'on admet que dans le cas d'un traitement par de la saumure, la toxicité est moindre, du fait de la présence naturelle, en Camargue, de cet élément dans l'eau et le sédiment des zones humides littorales, néanmoins l'efficacité de cette méthode ne peut être précisément déterminée, à ce stade de notre étude, bien que le développement des herbiers de Jussie soit effectivement ralenti par ce traitement. Le salage voit son efficacité accrue quand il est allié à l'assèchement du site envahi. Dans les roubines ou les canaux non asséchables, le salage est également efficace mais il faudrait le combiner à une méthode d'arrachage manuel, plus minutieuse pour ce type d'écosystème.

Une prospection plus large et à plus long terme devrait permettre d'affirmer avec certitude l'efficacité de la méthode testée. Les premiers résultats sont encourageants et justifient la poursuite de cette recherche appliquée.

Toutefois si l'on tient compte du fait que *L. peploides* se développe à l'embouchure du Rhône, dans le domaine de La Palissade où la conductivité de l'eau est de $3340 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et la teneur en chlorures de $1065 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, le caractère euryhalin de *L. peploides* peut amener la question fondamentale de l'efficacité d'un traitement par le sel. On peut émettre l'hypothèse que celui-ci n'affaiblirait cette plante que localement, dans des sites où la salinité restera initialement faible et ce, vraisemblablement, à court terme.

En revanche, l'écologie de *Ludwigia grandiflora* définit cette espèce comme vivant dans des eaux douces et de ce fait, sans doute plus vulnérable au sel. Il serait donc intéressant de tester cette méthode de lutte sur le site du Scamandre, par exemple, où cette espèce est présente.