



# Vulnérabilité aux changements globaux des mares littorales utilisées pour la reproduction par le Crapaud calamite (*Epidalea calamita*)

*Evaluation du site des Etangs et marais des salins de Camargue*

*Enquête auprès des gestionnaires de Provence-Côte d'Azur et  
Languedoc-Roussillon*



Photos : C. Le Gac, A. Olivier

en partenariat avec :



Conservatoire  
du littoral

avec le soutien financier de :



# Vulnérabilité aux changements globaux des mares littorales utilisées pour la reproduction par le Crapaud calamite (*Epidalea calamita*)

*Evaluation du site des Etangs et marais des salins de Camargue*

*Enquête auprès des gestionnaires de Provence-Côte d'Azur et  
Languedoc-Roussillon*

*Cette étude a bénéficié  
du soutien financier de  
l'Agence de l'Eau  
Rhône Méditerranée Corse*



Citation recommandée : Fayard A., Olivier A., Béchet A., Tetrel C., Luna-Laurent E., Besnard A. & Thibault M. 2021. Vulnérabilité aux changements globaux des mares littorales utilisées pour la reproduction par le Crapaud calamite (*Epidalea calamita*), évaluation du site des Etangs et marais des salins de Camargue, enquête auprès des gestionnaires de Provence-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon. Rapport Tour du Valat pour l'Agence de l'Eau

# SOMMAIRE

<b>Résumé</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Introduction et objectifs de l'étude</b> .....	4
<b>1. Etude des mares littorales des Etangs et marais des salins de Camargue</b> .....	6
1.1. Matériel et méthode.....	6
1.1.1. Site d'étude .....	6
1.1.2. Modèle biologique.....	7
1.1.3. Méthodologie .....	9
1.1.3.1. Collecte des données .....	9
1.1.3.2. Analyse des données.....	12
1.2. Résultats .....	14
1.2.1. Les mares littorales du site .....	14
1.2.1.1. Localisation et recensement des MTL sur le site des EMSC.....	14
1.2.1.2. Hydrodynamique et conductivité des mares .....	17
1.2.1.2.1 Pluviométrie et surcotes du niveau marin .....	17
1.2.1.2.2. Dynamique de l'hydropériode printanière des mares .....	17
1.2.1.2.3. Relation entre la conductivité et la lame d'eau des MTL .....	18
1.2.1.2.4. Relations entre la conductivité de surface et les caractéristiques environnementales....	19
1.2.2. Utilisation des mares pour la reproduction du Crapaud calamite .....	21
1.2.2.1. Occupation des mares temporaires littorales.....	21
1.2.2.2. Tolérance au sel du Crapaud calamite .....	24
1.3. Discussion .....	25
<b>2. Enquête auprès de gestionnaires d'espaces naturels protégés</b> .....	29
2.1. Objectifs .....	29
2.2. Méthodologie .....	29
2.3. Résultats .....	29
2.3.1. Résultats généraux .....	29
2.3.2. Connaissances par les gestionnaires des amphibiens présents sur les sites littoraux et péri-littoraux .....	31
2.3.3. Les suivis réalisés sur les sites .....	33
2.3.4. Connaissances de phénomènes d'extinction locale.....	34
2.3.5. Perception de l'enjeu du phénomène de salinisation .....	35
2.3.6. Faisabilité et pertinence de la mise en place d'un indicateur commun.....	37
<b>3. Conclusion</b> .....	38
<b>Remerciements</b> .....	39
<b>Références bibliographiques</b> .....	40
<b>Annexes</b> .....	43

## Résumé

La salinisation des zones humides littorales résultant de l'élévation du niveau marin est l'un des nombreux effets attendus du réchauffement climatique. Dans les plaines du littoral Méditerranéen, ce phénomène concerne notamment les mares et marais temporaires oligo- et mésohalins, ainsi que la faune et la flore associées à ces milieux.

Nous avons étudié cette vulnérabilité sur le site des Etangs et marais des salins de Camargue (Bouches-du-Rhône, France), auparavant exploité pour la production de sel et soumis à des évolutions importantes depuis son transfert au Conservatoire du littoral entre 2008 et 2012. La formation de brèches sur les anciennes digues de protection et plus généralement, le processus de renaturation du littoral, amènent les lagunes de ces anciens salins à être reconnectées à la mer. Le Crapaud calamite *Epidalea calamita* (Laurenti, 1768) constitue potentiellement l'une des espèces les plus vulnérables à ces modifications, car il se reproduit dans des mares littorales temporaires qui sont pour la plupart situées en périphérie des lagunes et peuvent être soumises au risque de salinisation. Les données sur les caractéristiques physiques des mares littorales ainsi que sur la reproduction du Crapaud calamite ont été relevées durant quatre ans sur 47 parcelles d'un hectare visitées trois fois chaque printemps. À l'aide de modèle de type *site occupancy*, nous avons estimé que 60% [intervalle de confiance : 43% à 75%] des mares du site des Etangs et marais des salins de Camargue ont été utilisées comme habitat de reproduction par les adultes d'*E. calamita* en 2015. Au cours des deux années suivantes, ce taux d'occupation diminue en dessous de 40%, pour finalement être presque nul en 2018. Nos observations montrent que le succès de reproduction d'*Epidalea calamita* est faible et que seules quelques mares présentaient des conditions permettant à l'espèce de boucler son cycle de reproduction. Le nombre de mares présentant des conditions favorables à la reproduction a diminué tout au long des quatre années d'étude, du fait de la brièveté des périodes de mise en eau, d'une salinité trop importante ou bien de la conjonction de ces deux facteurs. Nos résultats mettent en évidence que les têtards de Crapaud calamite sont absents dans les eaux dépassant une salinité de 10,2 PSU. La période d'étude a été marquée par plusieurs années à très faibles précipitations annuelles, ainsi que par des épisodes importants de submersions marines, qui semblent être à l'origine d'une augmentation de la salinité des mares. L'occurrence de ces phénomènes et leur aggravation, dans un contexte de changement climatique et d'élévation du niveau marin, rendent incertain l'avenir de la population sur cette frange littorale.

Afin d'évaluer plus largement l'enjeu lié à la salinisation des mares du littoral méditerranéen, une enquête a été menée auprès d'un échantillon de personnes en charge de la gestion ou du suivi de 20 sites ou groupes de sites littoraux bénéficiant d'une protection réglementaire ou foncière et situés en régions Occitanie et Sud Provence-Alpes-Côte-d'Azur. 12 taxons d'amphibiens au total sont présents sur l'ensemble des sites enquêtés. Près de la moitié des sites et groupes de sites enquêtés font l'objet de suivis ciblant une ou plusieurs espèces d'amphibiens, avec une grande diversité de protocoles mis en œuvre. 7 sites ou groupes de sites sont concernés par des phénomènes récents d'extinction locale, avérée ou suspectée. Le Pélobate cultripède (*Pelobates cultripipes*) est l'espèce la plus fréquemment mentionnée comme localement éteinte. Cependant, sa disparition n'est formellement attribuée au phénomène de salinisation que sur un seul site. Plus largement pour les cortèges d'amphibiens présents et à long terme, le phénomène de salinisation est évalué comme constituant un enjeu avéré sur la moitié des sites ou groupes de sites enquêtés. Nous recommandons que les suivis des amphibiens là où ils sont déjà mis en place, soient complétés de suivis portant sur les niveaux d'eau, les salinités et éventuellement les hydropériodes, lorsque ces variables ne sont pas encore mesurées. La mise en place de suivis sur de nouveaux sites peut également être encouragée.

**Mots-clés :** écosystèmes littoraux, mer Méditerranée, *Epidalea calamita*, Bufonidés, osmo-tolérance, mares littorales, marinisation, changements climatiques.

## Abstract

The salinization of coastal wetlands resulting from sea level rise is one of the many effects expected from global warming. In the coastal plains of the Mediterranean Basin, this phenomenon particularly concerns oligo- and mesohaline temporary ponds and marshes, as well as the fauna and flora associated with these environments.

We have studied this vulnerability on the Camargue's former saltworks site (Bouches-du-Rhône, France), formerly used for salt production and subject to major changes since its transfer to the Conservatoire du littoral between 2008 and 2012. The formation of breaches along the former protection dikes and, more generally, the process of renaturalization of the coastline, are causing the lagoons of these former saltworks to be reconnected to the sea. The Natterjack toad (*Epidalea calamita*) is potentially one of the species most vulnerable to these modifications, as it breeds in temporary coastal pools, most of which are located on the periphery of the lagoons and may be subject to the risk of salinization. Data on the physical characteristics of the coastal ponds as well as on the reproduction of the Natterjack toad were collected over a four-year period on 47 one-hectare plots visited three times each spring. Using the site occupancy model, we estimated that 60% (range 43-75%) of pools located at this site were used as breeding habitat by adults of *E. calamita* in 2015. Over the next two years, this occupancy rate decreases to below 40%, and finally to almost zero in 2018. Our observations show that the reproductive success of *Epidalea calamita* is low and that only a few ponds presented conditions that allowed the species to complete its reproductive cycle. The number of ponds presenting favourable conditions for reproduction decreased throughout the four years of the study, because of the short periods of impoundment, excessive salinity or the conjunction of these two factors. Our results show that *Epidalea calamita* tadpoles are absent in waters with a conductivity above 10,2 PSU. The study period was marked by several years with very low annual rainfall, as well as significant episodes of marine submersion, which seem to be the cause of an increase in the salinity of the ponds. The occurrence of these phenomena and their aggravation, in a context of climate change and rising sea levels, make the future of the population on this coastal area uncertain.

In order to assess more globally the issue related to the salinization of ponds on the Mediterranean coast, a survey was carried out among a sample of people in charge of the management or monitoring of 20 coastal sites or groups of sites benefiting of regulatory or land protection in the Occitanie and Sud Provence-Alpes-Côte-d'Azur regions. A total of 12 amphibian taxa are present on all the sites surveyed. One or more amphibian species are monitored in nearly half of the sites and groups of sites surveyed, with a wide variety of protocols implemented. 7 sites or groups of sites are concerned by recent phenomena of local extinction, either confirmed or suspected. *Pelobates cultripipes* is the most frequently mentioned locally extinct species, however its disappearance is formally attributed to the phenomenon of salinization at only one site. More generally, for the communities of amphibians and in the long term, salinization is a recognized issue at half of the sites or groups of sites surveyed. We recommend that the monitoring of amphibians, where it is already in place, be supplemented by monitoring of water levels, salinities and possibly hydroperiods, when these variables are not yet measured. The implementation of monitoring at new sites can also be encouraged.

**Keywords:** coastal ecosystems, Mediterranean Sea, *Epidalea calamita*, Bufonidae, osmo-tolerance, coastal ponds, marinsation, climate change.

## Introduction et objectifs de l'étude

Le réchauffement climatique induit par l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a de multiples conséquences sur l'hydrologie des zones humides. Une des conséquences directes attendues en particulier dans une partie du bassin Méditerranéen est la diminution des précipitations, en quantité et/ou en fréquence, avec une dégradation directe du bilan hydrique pouvant accentuer les phénomènes d'assèchement des zones humides (Giorgi & Lionello 2008 ; Cramer *et al.* 2018). Une autre conséquence, moins directe, est l'élévation rapide du niveau de la mer. Cette élévation a été estimée à au moins 3,1 mm par an en moyenne entre 1993 et 2012 (Cazenave *et al.* 2014). A long terme, l'élévation du niveau marin provoquera une marinisation d'une partie des zones humides littorales. Par ailleurs le changement climatique pourrait aggraver les événements extrêmes, tels que les phénomènes de surcotes marine associés à des dépressions atmosphériques, ainsi que les phénomènes d'érosion côtière (Clus-Auby *et al.* 2006).

Les zones humides littorales, et notamment les mares temporaires, sont susceptibles d'être particulièrement affectées par ces changements. Les mares sont des étendues d'eau stagnante peu profondes, permanentes ou temporaires, et de faible superficie. Ces caractères rendent les mares extrêmement dépendantes des variations hydrologiques saisonnières (Cantonati *et al.* 2005). Si des suivis physiques et hydrologiques permettent de mesurer l'évolution de la présence et de la distribution des mares, il est intéressant d'évaluer leur fonctionnement écologique, notamment à travers le rôle que ces mares jouent comme habitat pour la biodiversité. Or, la protection des mares est souvent négligée à cause de leur faible superficie, et elles sont souvent omises des plans de conservation et de gestion qui priorisent les zones humides plus vastes, comme les lacs ou les étangs (Boix *et al.* 2012 ; Directive Habitat Faune Flore 92/43/CEE).

Les mares temporaires du littoral méditerranéen (MTL) sont menacées, des centaines d'entre elles ayant disparu ces dernières décennies, détruites ou perturbées entre autres par les effets du changement climatique (Bagella *et al.* 2016 ; Calhoun *et al.* 2017 ; Grillas *et al.* 2004). Les mares littorales sont aussi exposées à des phénomènes de salinisation étant donné leur proximité avec la mer et une plus forte exposition au risque de submersion marine (Bawedin 2004). Ainsi, les phénomènes d'érosion littorale et d'élévation du niveau marin sont susceptibles de modifier profondément leur hydrodynamique.

Les amphibiens constituent des espèces emblématiques des mares temporaires et sont donc particulièrement susceptibles d'être affectés par la dégradation ou la disparition de ces habitats. Le déclin des batraciens est mondial (Reading 2007) et n'épargne pas les Bufonidés, famille comprenant le plus d'espèces menacées par un risque d'extinction rapide (Stuart *et al.* 2004). Même si plusieurs espèces sont décrites comme halotolérantes (Hopkins *et al.* 2016), une concentration en sel se rapprochant de celle de l'eau de mer leur est fatale, notamment en période de reproduction (Thirion 2014). C'est pourquoi la salinisation des mares temporaires littorales est susceptible de dégrader la fonction d'habitat de reproduction pour ces espèces. Les amphibiens constituent donc un groupe taxonomique privilégié pouvant servir d'indicateur de la fonctionnalité écologique des mares.

Entre 2008 et 2012, le Conservatoire du littoral a acquis auprès de la compagnie des Salins du Midi une surface de 6 500 ha comprenant des salins côtiers près du village de Salin-de-Giraud en Camargue. Ces terrains, aujourd'hui dénommés Etangs et Marais des Salins de Camargue (EMSC), font l'objet d'un vaste projet de renaturation. L'objectif est de restaurer le fonctionnement naturel de ces terrains convertis en salins durant la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Ainsi, depuis 2011 une partie du site fait l'objet d'une dépoldérisation progressive et naturelle, qui se traduit par l'effacement d'une partie des digues situées en front de mer, du fait de l'érosion littorale. Cet abandon d'une partie des infrastructures de protection répond à une volonté de restauration d'un fonctionnement hydrologique

plus naturel et d'adaptation locale à l'érosion et à la vulnérabilité face à la submersion marine à laquelle fait face le littoral français (Goeldner-Gianella *et al.* 2013). Le rétablissement de cycles naturels de mise en eau et d'assèchement des anciens partènements salicoles s'accompagne, à court et moyen terme, de changements écologiques majeurs, avec par exemple une forte dynamique de colonisation par les salicornes annuelles et les fourrés halophiles (Tour du Valat 2016).

Les EMSC comprennent un ensemble important de zones humides temporaires (mares inter-dunaires, dépressions inondées au sein des sansouires recolonisant les anciens marais salants). Ces mares littorales sont susceptibles d'être affectées par des changements écologiques importants (i.e. changements de régime hydrologique et de salinités, augmentation de la vulnérabilité aux submersions marines, disparition des habitats par marinisation) à court, moyen ou long terme. Il est donc urgent de mieux comprendre comment les changements en cours vont affecter le fonctionnement et les conditions écologiques de ces mares sur un territoire situé au front de la marinisation du littoral Méditerranéen.

La présence de plusieurs espèces d'amphibiens est historiquement connue sur ces anciens salins. Le travail de Guillaume (1975) a permis de recenser la Rainette méridionale (*Hyla meridionalis*), le Pélobate cultripède ainsi que le Crapaud calamite. Seule cette dernière espèce, qui est opportuniste et profite des habitats dunaires et de la faible compétition avec les autres espèces d'amphibiens pour les sites de reproduction (Beebee *et al.* 1993), est aujourd'hui commune sur ces anciens salins.

Nous avons donc choisi d'utiliser les populations de Crapaud calamite comme indicateur de l'évolution de la fonctionnalité écologique des mares littorales des EMSC, afin d'évaluer les effets des changements (en particulier changement climatique, élévation du niveau de la mer, changements de gestion) intervenant sur ces milieux.

Dans un premier temps, nous avons localisé et cartographié les MTL sur l'ensemble du site d'étude et nous nous sommes focalisés sur le risque de salinisation induit par les phénomènes de submersion marine. En particulier, nous nous sommes efforcés d'identifier les paramètres physiques qui sont corrélés, ou qui expliquent, les variations de salinité de ces MTL. Puis nous avons étudié l'occupation de ces mares par les crapauds calamites afin de vérifier si l'habitat demeurerait favorable à la reproduction de cette espèce. Afin d'intégrer les probabilités de détection des amphibiens, ce suivi de l'occupation des MTL a été effectué par la méthode de « site occupancy » (MacKenzie *et al.* 2002, 2003). Nous avons également mesuré différentes variables des mares (niveau d'eau, surface en eau, conductivité, présence de végétation aquatique et de poissons) définissant les conditions environnementales rencontrées sur un échantillon de sites de reproduction, simultanément à la mesure de l'occupation des sites par les amphibiens.

Parallèlement à l'utilisation du Crapaud calamite comme espèce indicatrice du fonctionnement des mares, des relevés topographiques ont été réalisés pour estimer les relations entre l'altitude et les conditions hydrologiques de ces mares, permettant d'interpréter les résultats obtenus concernant l'occupation des mares par les amphibiens dans une perspective de changements globaux. Cela nous a permis de discuter de l'état de conservation de cette population d'amphibiens dans le contexte de renaturation des EMSC.

Le second objectif de cette étude était d'évaluer plus largement l'enjeu lié à la salinisation des mares sur le littoral méditerranéen et préciser dans quelle mesure un suivi pourrait être généralisé spatialement et dans le temps, pour mesurer l'effet de la marinisation à une échelle plus large, sur la communauté d'amphibiens utilisant ces habitats menacés. Une enquête a été réalisée auprès des gestionnaires d'espaces naturels protégés.

# 1. Etude des mares littorales des Etangs et marais des salins de Camargue

## 1.1. Matériel et méthode

### 1.1.1. Site d'étude

Le site d'étude est constitué par les Etangs et Marais des Salins de Camargue (EMSC), un territoire de 6500 ha situé dans l'île de Camargue, sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer, à environ 8 kilomètres à l'ouest du village de Salin-de-Giraud dans les Bouches-du-Rhône (Figure 1). Les EMSC sont la propriété du Conservatoire du littoral qui en a confié la gestion au Parc naturel régional de Camargue, la Fondation Tour du Valat et la Société Nationale de Protection de la Nature - Réserve Naturelle Nationale de Camargue.

L'île de Camargue bénéficie d'un climat méditerranéen fortement ensoleillé (moyenne de 300 jours par an ; Tour du Valat 2012). Les données de la station météorologique Météo-France située à la Tour du Valat montrent que la Camargue est l'un des territoires recevant les précipitations annuelles parmi les plus faibles de France, avec une moyenne annuelle de 592 +/- 171 mm (période 1944-2018). De plus, le suivi des conditions climatiques montre que les précipitations présentent de fortes variabilités interannuelles (minima de 252 mm en 1989 et maxima de 1049 mm en 1996), favorisant l'installation d'une flore et d'une faune adaptées à ces contraintes (Grillas *et al.* 2004).

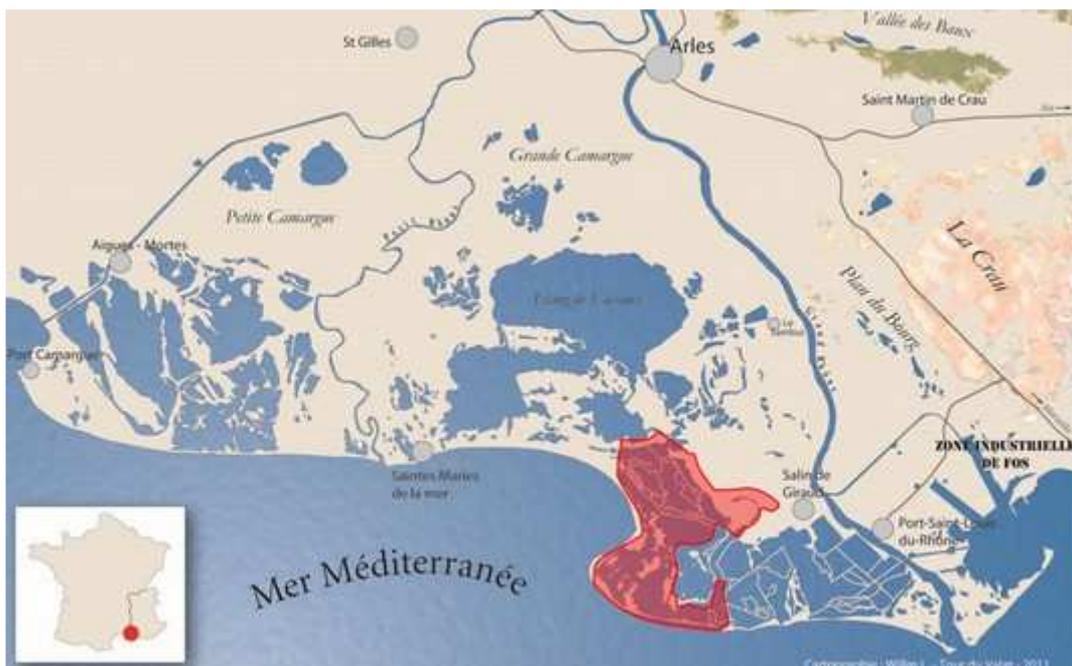


Figure 1. Localisation du site des Etangs et marais des salins de Camargue (EMSC).

La Camargue constitue un hydrosystème très particulier, puisqu'une grande partie du fonctionnement hydraulique du delta a été façonnée par l'action humaine. Endiguements, canaux, pompes et vannes ont permis jusqu'à aujourd'hui d'irriguer et de drainer les terres agricoles, mais aussi de produire du sel, d'évacuer les eaux pluviales et de limiter les effets des crues du Rhône et des intrusions marines.

Une des particularités du site d'étude est qu'il est constitué de deux entités, auparavant aménagées afin de répondre à des objectifs très différents : le secteur des anciens salins, inclus dans la Camargue

dite « laguno-marine », a longtemps conservé une forte naturalité avant d'être intégré à partir des années 1960, à l'exploitation du salin de Giraud ; le domaine de la Belugue, plus éloigné de la mer, est en grande partie situé dans la Camargue « fluvio-lacustre ». Il est traversé par un ancien bras du Rhône et comprend un réseau hydraulique permettant des apports d'eau douce et le drainage, notamment pour les besoins des activités agricoles et d'élevage.

Les principaux habitats inventoriés sur le site sont : les lagunes côtières, les fourrés halophiles méditerranéens constitués de salicornes pérennes (localement appelés sansouires ou enganes), les végétations à salicornes annuelles, les prés salés méditerranéens, les dunes (dunes embryonnaires, blanches et grises) et les sables littoraux. Les MTL sont situées pour la plupart dans des dépressions inter-dunaires et certaines d'entre elles sont d'origine anthropique. Ces milieux sont souvent proches de la mer. Quelques mares temporaires sont également présentes sur le secteur de la Belugue.

D'après les données topographiques (campagne LIDAR par survol, 2016), l'altitude de l'aire d'étude est comprise entre -1,0 (fond des lagunes les plus profondes) et +11,4 mètres NGF (point culminant des massifs dunaires). Durant la période de production salicole, des digues entouraient tous les étangs du site et le risque de submersion marine était contrôlé. Les niveaux d'eau et les salinités dans les étangs étaient gérés pour optimiser la pré-concentration du sel. La salinité des étangs pouvait donc varier rapidement au fil des saisons. L'hydrologie des MTL situées dans les massifs dunaires en périphérie de ces étangs, était indépendante des systèmes lagunaires gérés pour la production de sel.

### 1.1.2. Modèle biologique

Le Crapaud calamite *Epidalea calamita* est un anou de la famille des Bufonidés, protégé internationalement par la Convention de Berne (listé en annexe 2, 1979), sur le territoire européen par la Directive Habitats-Faune-Flore (listé en annexe 4, 1992) et en France par la loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 [dernier arrêté en vigueur de protection des amphibiens et des reptiles : arrêté 19. 11. 2007. art. 2 (protection des individus et des habitats)].

*E. calamita* est considéré comme étant de « préoccupation mineure » (LC : *Least Concern*) selon les critères de l'UICN dans le monde, en France, ainsi qu'en région PACA (Marchand *et al.* 2017). Cette espèce strictement européenne est présente du sud de l'Espagne aux états Baltes (Beebee 1997; ACEMAV Coll *et al.* 2003). Elle occupe l'ensemble des régions françaises à l'exception de la Corse (où elle est remplacée par le Crapaud vert, *Bufo viridis*) et des massifs montagneux élevés, préférant les zones de plaine non boisées (Le Garff & Geniez 2012). Ce crapaud affectionne les milieux ouverts et les terrains sablonneux. Les sites de reproduction sont des mares plus ou moins temporaires, possédant généralement peu ou aucune végétation aquatique (Graitson *et al.* 2007; Jakob 2004). Les adultes se distinguent des autres espèces par leur ligne vertébrale jaunâtre, l'iris de l'œil jaune et leur pupille horizontale (Figure 2). La période de reproduction est variable selon les régions et dépend des précipitations automnales et printanières d'une année donnée (Beebee *et al.* 1993). La croissance rapide des têtards permet au Crapaud calamite de se contenter d'une courte durée d'inondation (deux à cinq mois) pour se reproduire, ce qui l'amène à coloniser préférentiellement des milieux temporaires, et d'éviter ainsi la compétition avec d'autres espèces d'amphibiens ; en Languedoc-Roussillon, les pontes sont déposées au printemps, de fin février jusqu'en juillet, et plus rarement de fin août à novembre (Geniez & Cheylan 2012).



Figure 2. Crapaud calamite adulte (© M. Thibault)

Le Crapaud calamite est un amphibien qualifié « d'euryhalin modéré » (Gomez-Mestre & Tejedo 2003), car relativement tolérant à la salinité. La tolérance au stress osmotique (Hopkins *et al.* 2016), semble être un facteur propre à chaque espèce d'amphibien (Thirion 2014 ; Hopkins & Brodie Jr. 2015). Le seuil de tolérance du Crapaud calamite varie selon les stades de vie de l'individu, et peut-être également entre populations (Gomez-Mestre & Tejedo 2004). Selon les travaux de Beebee (1985), confirmés par les expériences de Gomez-Mestre & Tejedo (2003) et Mathias (1971), le seuil de tolérance est de 10 PSU (practical salinity unit) pour les pontes et les têtards et monte jusqu'à 17 PSU pour les adultes. Les têtards et les pontes semblent donc constituer les stades les plus sensibles à l'exposition au sel.

L'espèce est présente sur le littoral méditerranéen. En Camargue, on la retrouve à proximité des lagunes côtières, alors qu'elle semble avoir disparu de presque tous les marais d'eau douce (Tour du Valat 2012) peut-être du fait que les importants aménagements cynégétiques réalisés durant les dernières décennies et la gestion hydraulique pratiquée dans ces marais ne conviennent plus à l'espèce (assèchement printanier et/ou remise en eau estivale, gestion en marais permanent).

Sur le site d'étude, la plus ancienne observation de Crapaud calamite remonte à 1952, juste avant sa conversion pour la saliculture. Pendant la période d'exploitation salicole, des prospections occasionnelles suggèrent que l'espèce était abondante et, jusqu'en 2011, des individus étaient observés en phase de reproduction aux alentours des lagunes salicoles (Annexe 4).

Au moment de leur transfert au Conservatoire du littoral, les EMSC abritaient incontestablement l'une des plus importantes populations de Crapaud calamite de l'île de Camargue (Olivier & Cheylan 2019 ; Olivier *et al.* 2019). Des prospections par points d'écoute et recherche de sites de ponte de mars à avril 2010 puis en avril 2011 ont permis de recenser 469 mâles chanteurs et 56 amplexus de Crapaud calamite (Tour du Valat 2012). Les localisations de ces observations ont servi de base de référence pour ce projet.

### 1.1.3. Méthodologie

#### 1.1.3.1. Collecte des données

- **Stratégie d'échantillonnage**

La première étape du protocole d'échantillonnage a été de construire un maillage des EMSC écartant les étangs, lagunes et autres habitats salés régulièrement soumis à des submersions marines prolongées et jugés défavorables à la présence de MTL. Le maillage ainsi obtenu comporte 1 271 mailles d'un hectare et couvre environ 20% de la superficie totale des anciens salins (Figure 3).

Notre stratégie d'échantillonnage visait à couvrir une superficie représentative de la répartition des MTL sur les EMSC. Nous avons choisi de sélectionner dans ce maillage des parcelles d'un hectare dans lesquelles nous avons mené des prospections permettant d'identifier et localiser les mares et d'évaluer leur utilisation pour la reproduction du Crapaud calamite. Ce choix d'échantillonnage par parcelle plutôt que par mare se justifie par la particularité de notre site d'étude, de très grande superficie et où la surface et le nombre de MTL peut fortement varier d'une année à l'autre et au sein de la même saison en fonction de la pluviométrie. Cette stratégie d'échantillonnage est également utilisée au niveau national pour le suivi des populations d'amphibiens (<http://lashf.org/popamphibien-2/>).

Nous avons ensuite choisi d'échantillonner deux strates différentes de parcelles. Dans un premier temps, nous avons *présélectionné* 19 parcelles du fait qu'elles contenaient des sites de reproduction connus (Tour du Valat 2012). C'est la strate des *parcelles présélectionnées*. Ces parcelles ont été parcourues au cours des quatre années d'étude. Dans un second temps un jeu de 28 parcelles supplémentaires a été sélectionné aléatoirement chaque année au sein de l'ensemble de la zone d'étude. C'est la strate des *parcelles aléatoires*. Au total, 47 hectares étaient donc prospectés chaque année. Les parcelles aléatoires ont été identifiées par tirage aléatoire simple, avec remise d'une année sur l'autre, sous le logiciel R. L'intégration d'un tirage aléatoire permet de tenir compte du fait que les inventaires réalisés avant la présente étude n'étaient pas exhaustifs, d'anticiper sur la disparition possible de mares faisant partie de l'échantillon présélectionné et inversement, de mieux caractériser l'apparition éventuelle de nouvelles mares, et leur colonisation par l'espèce, résultant de la dynamique géomorphologique du site.

- **Prospection**

Dans le Sud de la France, le Crapaud calamite se reproduit principalement au printemps entre mars et juin. Chez cette espèce, des pontes automnales peuvent également avoir lieu (ACEMAV Coll *et al.* 2003, Geniez & Cheylan 2012). Toutefois, la reproduction n'a jamais été détectée en automne sur le site d'étude malgré des prospections régulières. Les parcelles ont donc été prospectées à trois reprises chaque printemps en tenant compte de la phénologie de la reproduction. Le premier passage était effectué entre le 15 mars et le 8 avril, le second entre le 15 avril et le 8 mai et le dernier entre le 15 mai et le 8 juin. L'intervalle de temps entre deux passages sur une même parcelle est suffisamment court pour limiter le risque qu'il y ait des déplacements de dispersion entre mares et permet de postuler que les parcelles sont « fermées » à ce type de déplacement, respectant ainsi les prérequis des modèles de *site occupancy* (MacKenzie *et al.* 2017).

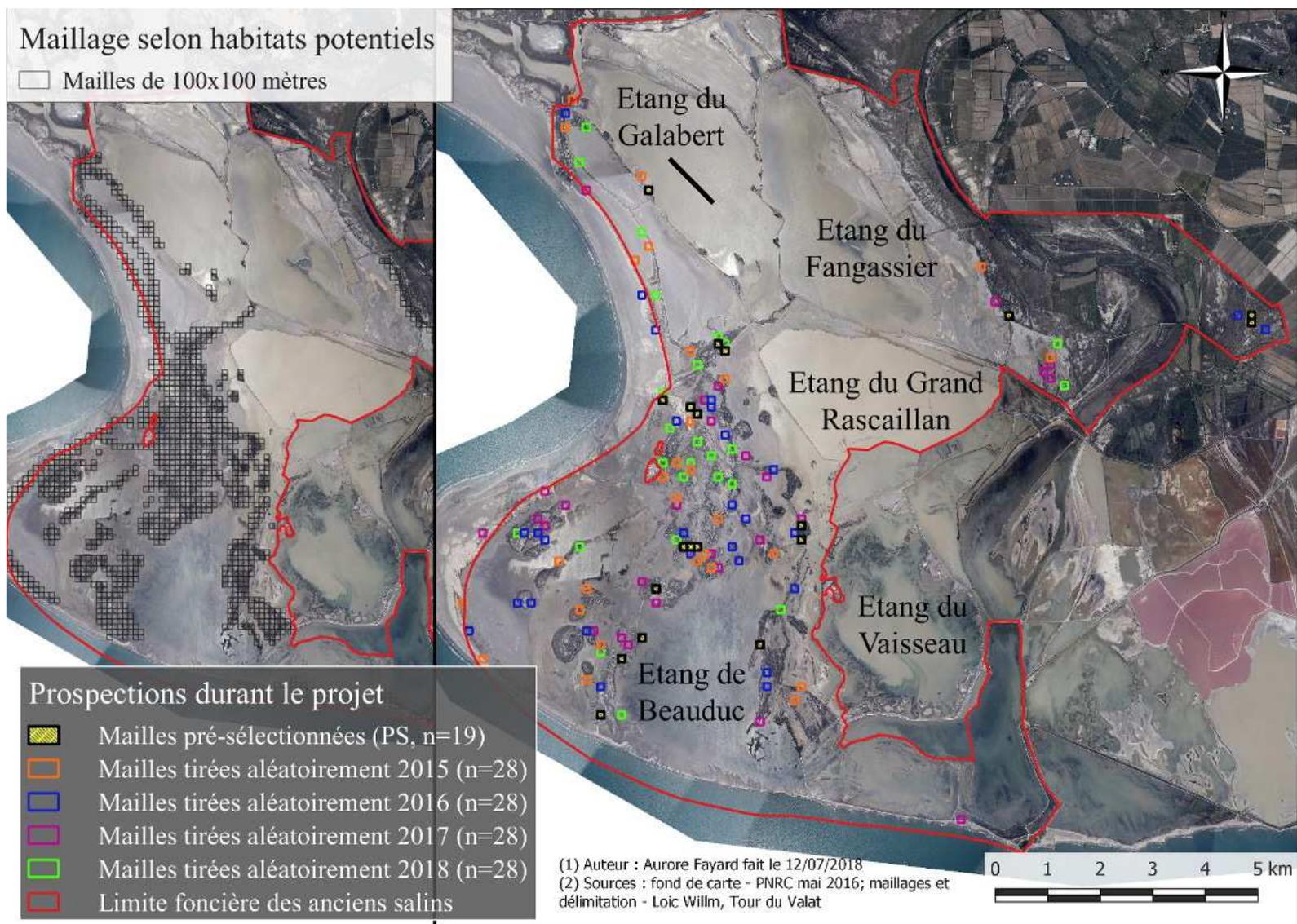


Figure 3. Cartographie du maillage de la zone d'étude des anciens salins et toponymie des principaux étangs. A gauche, le maillage correspondant aux habitats potentiels d'*Epidalea calamita*. A droite, le total des parcelles prospectées selon les années, en distinguant les parcelles présélectionnées et celles tirées aléatoirement.

Le suivi a été réalisé en journée au vu des contraintes d'accès aux sites et pour assurer la sécurité des observateurs. Une dizaine d'observateurs a été mobilisée chaque année, se voyant attribuer un nombre de parcelles de façon équilibrée (Annexe 1). Les prospections prenaient en moyenne 30 minutes par parcelle, sachant qu'il n'y avait pas de contrainte sur la durée de prospection. Une seule parcelle peut contenir plusieurs MTL comme aucune (pour les parcelles tirées au sort). Le protocole d'échantillonnage ainsi que la fiche de relevé de terrain figurent en annexes 2 et 3. Cette méthode permet, de manière standardisée, de répondre aux objectifs de recenser et localiser les MTL, collecter les paramètres physiques propres à celles-ci en période de reproduction et déterminer si cet habitat est utilisé pour la reproduction d'*E. calamita*.

Sept types d'indices de reproduction du Crapaud calamite ont été relevés sur le terrain :

- (i) l'observation ou l'audition de mâles chanteurs,
- (ii) l'observation d'amplexus (Figure 4.A),
- (iii) la présence d'adultes morts, dans ou autour d'une mare. La noyade est parfois provoquée par un comportement actif de plusieurs mâles, tentant d'agripper une femelle une fois dans l'eau. L'agrégation de plusieurs mâles sur une femelle peut aller jusqu'à la noyer (Tejedo 1988 in Graitson *et al.* 2007) (Figure 4.B),
- (iv) les pontes sous forme de fins cordons d'un à deux mètres de longueur, contenant de nombreux œufs noirs de petite taille (1 à 2 mm) (Figure 4.C),
- (v) les têtards vivants (Figure 4.D),
- (vi) les pontes non viables (Figure 4.E) et les têtards morts
- (vii) les imagos ou émergents (Figure 4.F). Les crapelets présentent déjà une ligne dorsale jaune, qui les rendent facilement distinguables des autres espèces d'anoures.

- **Relevés physiques**

Durant l'été 2017, nous avons mesuré les paramètres physiques propres aux 26 mares présentes dans 19 parcelles échantillonnées cette année-là : conductivité dans la mare, altitude du fond de la mare (mesurée au GPS différentiel), profondeur relative et conductivité de la nappe, nature du substrat du fond de la mare. Le suivi pluriannuel des conductivités des mares présélectionnées vise à évaluer leur vulnérabilité par rapport au risque de salinisation.

Afin d'étudier les paramètres influençant de façon potentielle ou avérée l'hydropériode des mares, nous avons utilisé les données pluviométriques issues de la station Météo-France de la Tour du Valat, la plus proche et située à 11 km du site. Pour chaque année de suivi, nous avons calculé une pluviométrie cumulée du mois de juillet de l'année n-1 aux mois d'avril, mai et juin de l'année n, cette dernière correspondant à une année de reproduction donnée. D'autre part, nous avons décrit les épisodes de surcote du niveau marin, en utilisant les données issues de la station de suivi la plus proche de la zone d'étude, située au Grau de la Fourcade (commune des Saintes-Maries-de-la-Mer) à environ 10 km au nord-ouest des EMSC. L'utilisation de ces données a permis de dater des tempêtes exceptionnelles pouvant influencer directement sur le niveau d'eau des étangs.



Figure 4. Différents stades de la reproduction du Crapaud calamite observés sur le site des Etangs et marais des salins de Camargue : (A) amplexus (photo : A. Olivier), (B) adulte mort dans une mare (photo : A. Olivier), (C) : ponte (photo : A. Olivier), (D) têtards (photo : A. Olivier), (E) ponte non viable dans une mare exondée (photo : M. Thibault), (F) crapelet (photo : T. Fuentes).

#### 1.1.3.2. Analyse des données

- **Cartographies**

Les cartographies ont été réalisées sur le logiciel Qgis version 3.0. Le logiciel a également servi à calculer les distances entre les MTL et la mer et entre les MTL et les étangs.

- **Statistiques**

Nous avons examiné la variation des conductivités et des hauteurs d'eau des MTL occupées par *E. calamita* au cours de la période d'étude. Pour cela nous avons estimé les valeurs médianes de ces paramètres pour les mares et nous avons comparé les années à l'aide de tests de de Kruskal-Wallis.

Nous avons cherché à expliquer la conductivité de surface des MTL par différents paramètres (hauteur d'eau de la mare, profondeur de la nappe, conductivité de la nappe) grâce à un modèle linéaire afin de mieux comprendre comment l'environnement spatial et souterrain influençait la fonctionnalité de ces mares pour *E. calamita*.

Nous avons cherché à estimer les valeurs de conductivité permettant la reproduction des crapauds calamites. Pour cela, nous avons considéré un sous échantillon de mares où il y a eu au moins une fois détection d'indices de reproduction. Afin d'estimer le seuil de conductivité au-dessus duquel la probabilité de rencontrer des indices de reproduction est nulle, nous avons utilisé les données de toutes les années confondues, ce qui conduit à avoir plusieurs réplicats d'une même MTL (pour celles qui sont relevées tous les ans). Afin de tenir compte de l'autocorrélation temporelle, nous avons utilisé l'identifiant unique de la mare comme effet aléatoire dans un modèle mixte pour lequel la variable réponse est la présence (ou non) d'indice de reproduction (GLMM avec erreur binomiale et lien logit ; Zuur & Iéno 2016) et l'effet de la conductivité est évalué en effet fixe. Nous avons converti les conductivités (mesurées en mS/cm) en unité de salinité pratique (PSU) afin de comparer les valeurs du modèle avec la littérature.

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (R core team 2019) et les figures ont été réalisées avec le package ggplot2 (Wickham & Chang 2015 ; version 2.2.1).

- **Modélisation de l'occupation des sites par le Crapaud calamite**

La méthode de *site occupancy* consiste à estimer la probabilité d'occupation des mares de l'aire d'étude par les crapauds calamites à un temps  $t$  (MacKenzie *et al.* 2002). Cette méthode non invasive (sans marquage) offre une approche performante pour le suivi d'espèces, même rares ou difficiles à détecter (Besnard 2013 ; Gimenez *et al.* 2014). Les observations de l'espèce suivie sont considérées comme des *événements* qui nous informent sur les deux *états* possibles d'une mare qui sont d'être occupée ou non par l'espèce sur le site. Cette approche nous permet de tenir compte du fait que les états demeurent incertains en raison d'observations imparfaites sur le terrain (probabilité de détection de l'espèce inférieure à 1 ; MacKenzie *et al.* 2002). Cette approche permet d'estimer le taux d'occupation ( $\psi$ ) de l'espèce sur un site donné durant la première année de relevé en tenant compte de la probabilité de détection de l'espèce sur les sites en question ( $p$ ). Si des parcelles sont suivies plusieurs années de suite, il est alors possible d'estimer la probabilité qu'un site soit colonisé ou bien abandonné par l'espèce de l'année  $t$  à  $t+1$  à l'aide de modèles dits « multiseason » (Mackenzie *et al.* 2003).

Nous avons construit un modèle simple en occupation multi-saisons (MacKenzie *et al.* 2017). Nous avons élaboré des matrices de transition avec deux événements (observations de présence ou d'absence de calamite, tous indices confondus) et deux états (occupé et non occupé) afin de formuler le modèle de site occupancy comme un modèle multi-événements ; Pradel 2005, Annexe 5). Le faible nombre d'observations de jeunes imagos ( $n = 6$  en 2015,  $n = 0$  en 2016, 2017 et 2018) ne nous a pas permis d'étudier précisément le succès de la reproduction quand celle-ci était observée.

Nous avons utilisé le logiciel E-SURGE 2.1.4 (Choquet *et al.* 2009) pour évaluer l'effet de la fréquence d'assèchement sur la probabilité d'occurrence des pontes et des têtards à l'aide d'une fonction logit.

Une fois la probabilité d'occupation des MTL par le Crapaud calamite estimée ( $\psi$  2015), un calcul simple (Formule ci-dessous) permet d'obtenir les probabilités d'occupation pour les années suivantes ( $t+1$ ) grâce aux probabilités de colonisations ( $\epsilon$ ) et d'extinctions ( $\gamma$ ) de l'année précédente ( $t$ ).

$$\psi_{t+1} = \psi_t - (\epsilon_t * \psi_t) + (\gamma_t * \psi_t)$$

Nous avons comparé trois modèles construits sur le jeu de parcelles pré-sélectionnées et évalué si la probabilité de détection ( $p$ ) dépendait des sessions ou de l'année et si la probabilité d'occupation initiale ( $\psi$ ) dépendait de l'année ou de la fréquence d'assèchement de la mare, ce dernier paramètre étant estimée par le ratio du nombre de fois qu'une MTL est trouvée sèche sur le nombre de visite de la mare au cours de la période d'étude. Les probabilités de colonisation et d'extinction ont été paramétrées pour dépendre de l'année. Nous avons sélectionné le meilleur modèle sur la base de la valeur de l'AIC (Burnham & Anderson 2004).

## 1.2. Résultats

### 1.2.1. Les mares littorales du site

#### 1.2.1.1. Localisation et recensement des MTL sur le site des EMSC

Ce sont au total 134 parcelles d'un hectare qui ont été prospectées au moins une fois sur le site d'étude entre 2015 et 2018. Cela représente environ 11% (134/1271 mailles) de la surface totale des habitats jugés comme pouvant potentiellement accueillir des sites de reproduction du Crapaud calamite.

Sur les parcelles *présélectionnées*, le nombre de mares varie de 1 à 6 par hectare. Pour les *parcelles aléatoires*, il est fréquent de n'observer aucune mare (2015 : 16 parcelles vides, 2016 et 2017 : 20 parcelles vides et 2018 : 11 parcelles vides). Globalement le pourcentage de parcelles qui contiennent au moins une MTL varie entre années, avec 40% en 2015, seulement 30% en 2016 et 2017, et 60% en 2018, le reste étant des parcelles sans mare en eau. On observe chaque année un réseau dense de mares au nord et à l'ouest de l'étang de Beauduc (Figure 5).

Nous avons observé 69 MTL en 2015. Le nombre de MTL au moins une fois en eau diminue en 2016 et 2017 pour remonter à 82 en 2018 (Figure 6).

Les mares sont trouvées dans une grande diversité de situations : la plupart sont situées en milieu dunaire, d'autres correspondent à des dépressions périodiquement inondées au sein des sansouires, d'autres enfin sont d'origine anthropique (Figure 7).

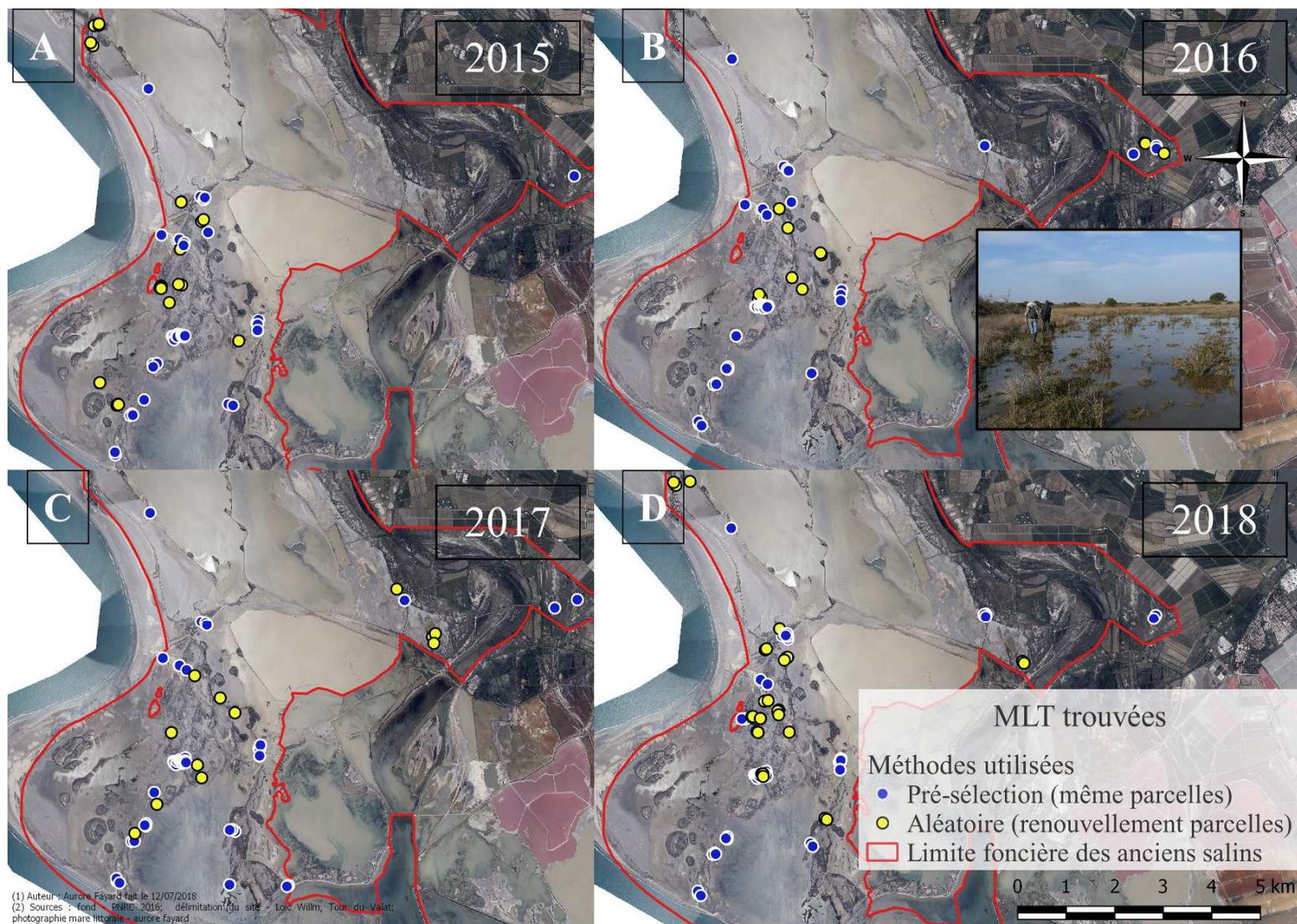


Figure 5. Localisations des mares temporaires littorales recensées par années selon les deux types d'échantillonnage employés.

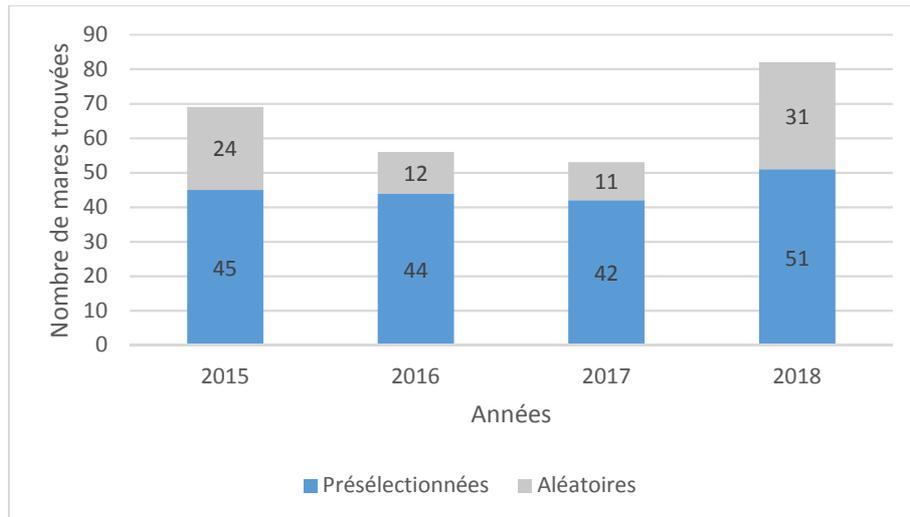


Figure 6. Nombre de MTL découvertes dans les parcelles présélectionnées et aléatoires en fonction des années.

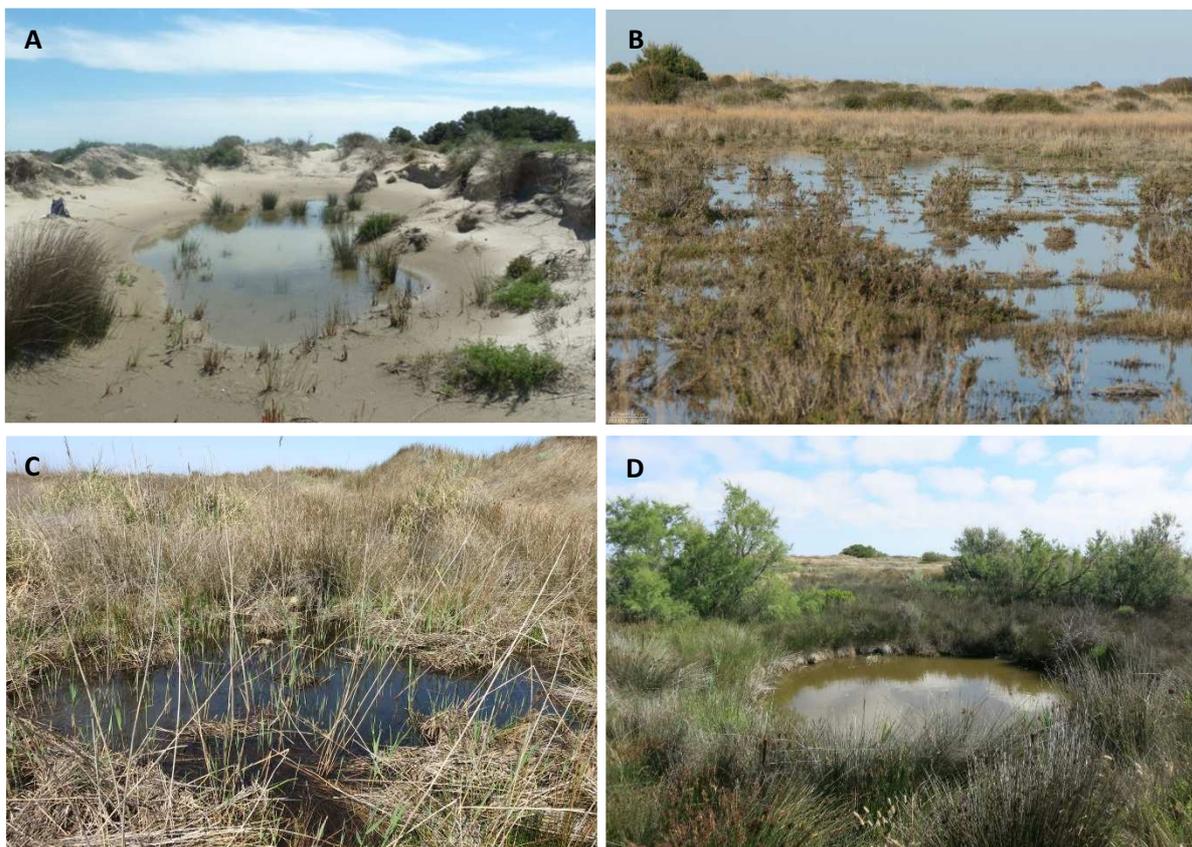


Figure 7. Exemples de situations des mares présentes sur les Etangs et marais des salins de Camargue, avec : A : mare dans une zone d'érosion de la dune grise (photo : A. Olivier) ; B : dépression inter-dunaire très irrégulièrement inondée, colonisée par différentes halophytes caractéristiques des sansouires et des steppes méditerranéennes à *Limonium* (i.e. : *Arthrocnemum glaucum*, *Limonium girardianum*, *Artemisia caerulescens*) (photo : C. Le Gac) ; C : mare située dans une dune grise (photo : M. Thibault) ; D : mare creusée près d'un point d'aménagement anthropique, à proximité du phare de Beauduc (photo : M. Thibault).

### 1.2.1.2. Hydrodynamique et conductivité des mares

#### 1.2.1.2.1 Pluviométrie et surcotes du niveau marin

La pluviométrie cumulée à prendre en compte pour la saison de reproduction 2015 a été près de deux fois supérieure à celles de 2017 et 2018, et elle était également nettement supérieure (+44%) à celle de 2016 (Figure 8). Chaque année la majeure partie des précipitations intervient de l'automne au début du printemps, soit normalement avant le premier passage de terrain dans notre cas. Les précipitations entre mars et juin sont globalement faibles la plupart des années, sauf en 2015 lorsqu'il est tombé plus de 110 millimètres au printemps. Les courbes de pluviométrie cumulée calculées pour les années 2016 et 2017 se situent largement en deçà de la moyenne pour la période 1944-2018.

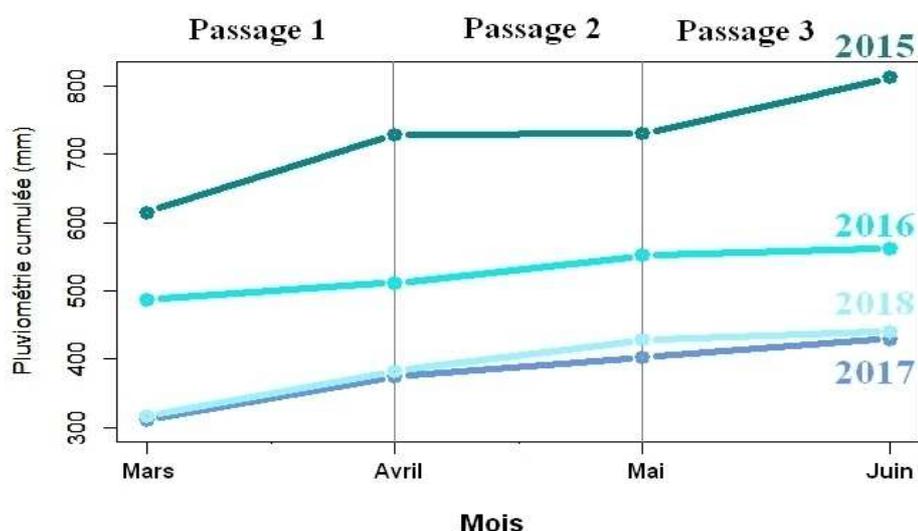


Figure 8. Pluviométrie cumulée (mm) du mois de juillet de l'année n-1 au printemps suivant (2015-2018). Les pluviométries cumulées au dernier point (juin) représentent 12 mois. Source : station météorologique Météo France Tour du Valat.

Deux tempêtes de grande envergure ont submergé les étangs du secteur des anciens salins au cours de la période d'étude : l'une le 7 février 2016, qui a duré 9 heures avec des valeurs de surcote entre 0,95 et 1,16 m NGF, et la seconde le 1<sup>er</sup> mars 2018, d'une durée de 4 heures avec des surcotes allant de 0,91 à 1,10 m NGF. Hormis ces deux événements extrêmes, le niveau marin a fluctué de manière constante, en moyenne de -0,2 à 0,6 m de 2011 à 2018, avec des pics à 0,8 m quelques fois par an. Ces deux épisodes de forte tempête sont suspectés d'avoir provoqué, selon les cas, la salinisation des eaux de surface des mares, ou bien la salinisation de la nappe.

#### 1.2.1.2.2. Dynamique de l'hydropériode printanière des mares

Le nombre de mares asséchées augmente nettement chaque année au cours des trois sessions de prospection, avec l'avancement de la saison (Figure 9).

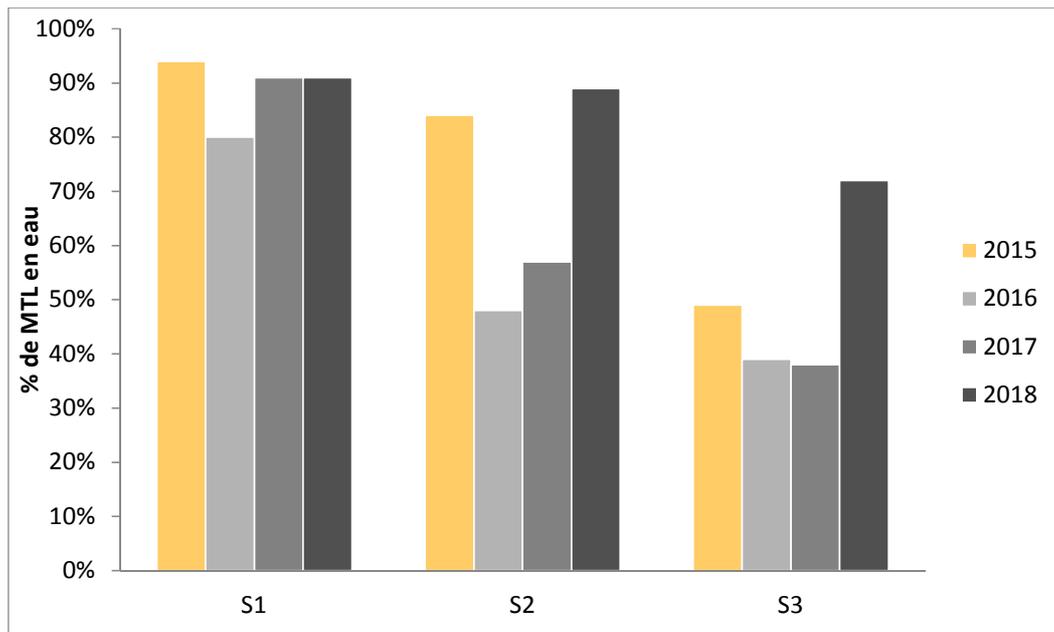


Figure 9. Pourcentage de mares temporaires littorales en eau en fonction des passages (S1, S2 et S3) et des années. La tendance est homogène sur les quatre années, c'est lors du troisième passage que les observateurs trouvent le plus de MTL asséchées. 2018 est l'année où il a été observé le moins de MTL asséchées.

#### 1.2.1.2.3. Relation entre la conductivité et la lame d'eau des MTL

Nous observons une augmentation significative des médianes de conductivité des MTL occupées par *E. calamita* au cours de la période d'étude et notamment entre les années 2015 et 2018 (test de Kruskal-Wallis significatif entre les années du premier passage (S1), avec  $n = 102$ ,  $\chi^2 = 20,138$ ,  $p = 0,0001$ ) et une différence significative entre les années 2015 et 2018 (test de Dunn  $n = 54$ ,  $\chi^2 = 20,14$ ,  $Z = -4,25$ ,  $p < 0,00001$  ; Figure 10).

La médiane des hauteurs d'eau du premier passage, mesurées dans les MTL en 2018, est supérieure aux médianes des précédentes années. Néanmoins, cette différence n'est pas significative même si on approche du seuil de significativité (test de Kruskal-Wallis avec  $n = 102$ ,  $\chi^2 = 7,758$ ,  $p = 0,0513$ ).

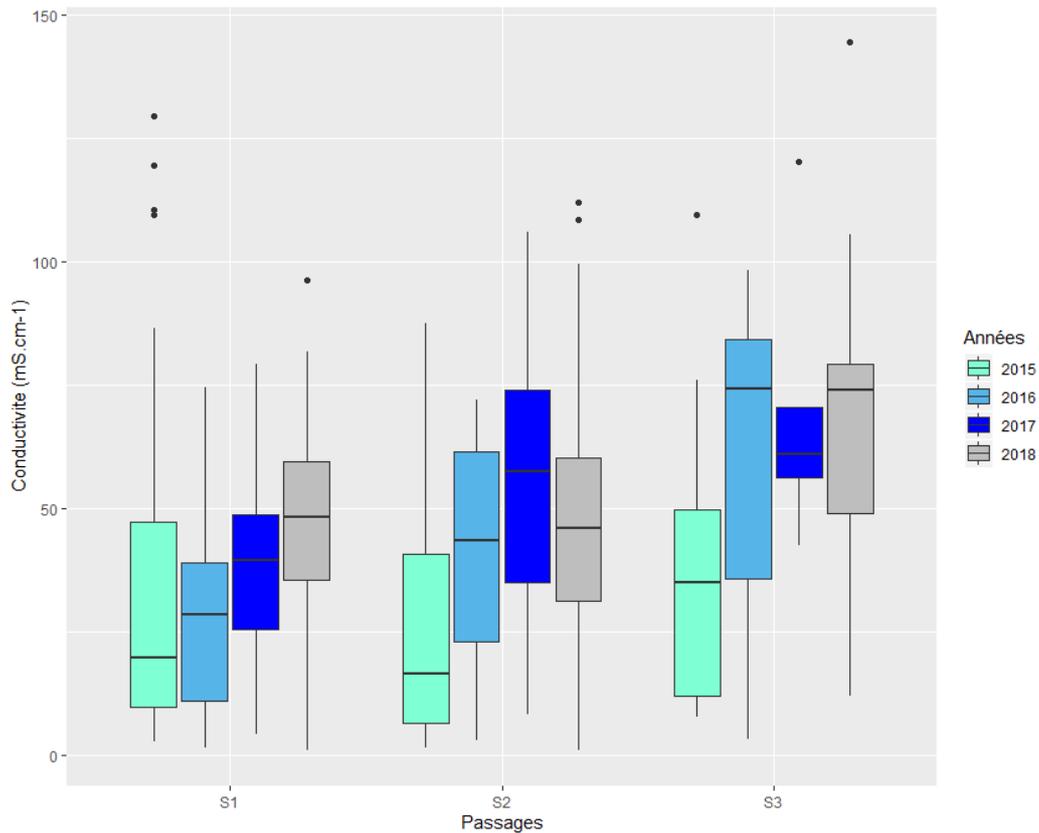


Figure 10. Boxplots des conductivités des mares littorales temporaires avec présence d'indices de reproduction d'*E. calamita* en fonction des passages et des années de relevés.

#### 1.2.1.2.4. Relations entre la conductivité de surface et les caractéristiques environnementales

En nous appuyant sur le jeu de données de 2017, nous avons cherché à expliquer ce qui influençait la conductivité des MTL. La conductivité dans les mares augmente avec la hauteur d'eau et diminue avec la profondeur de la nappe d'eau et la distance à l'étang le plus proche (Figure 11). La distance à l'étang le plus proche est la variable expliquant le mieux les variations de conductivité de surface. Plus d'un tiers des MTL sont situées à moins de 50 mètres d'un étang, la plus éloignée étant à 300 mètres (Figure 12). 50% des valeurs de conductivité sont comprises entre 13,1 et 39,4 mS/cm, soit des valeurs de salinité comprises entre 7,5 et 25,1 PSU. Les valeurs de conductivités de la nappe sont deux à quatre fois plus élevées qu'à la surface, avec 50% des valeurs comprises entre 83,6 et 105,5 mS/cm, soit entre 59,9 et plus de 100 PSU.

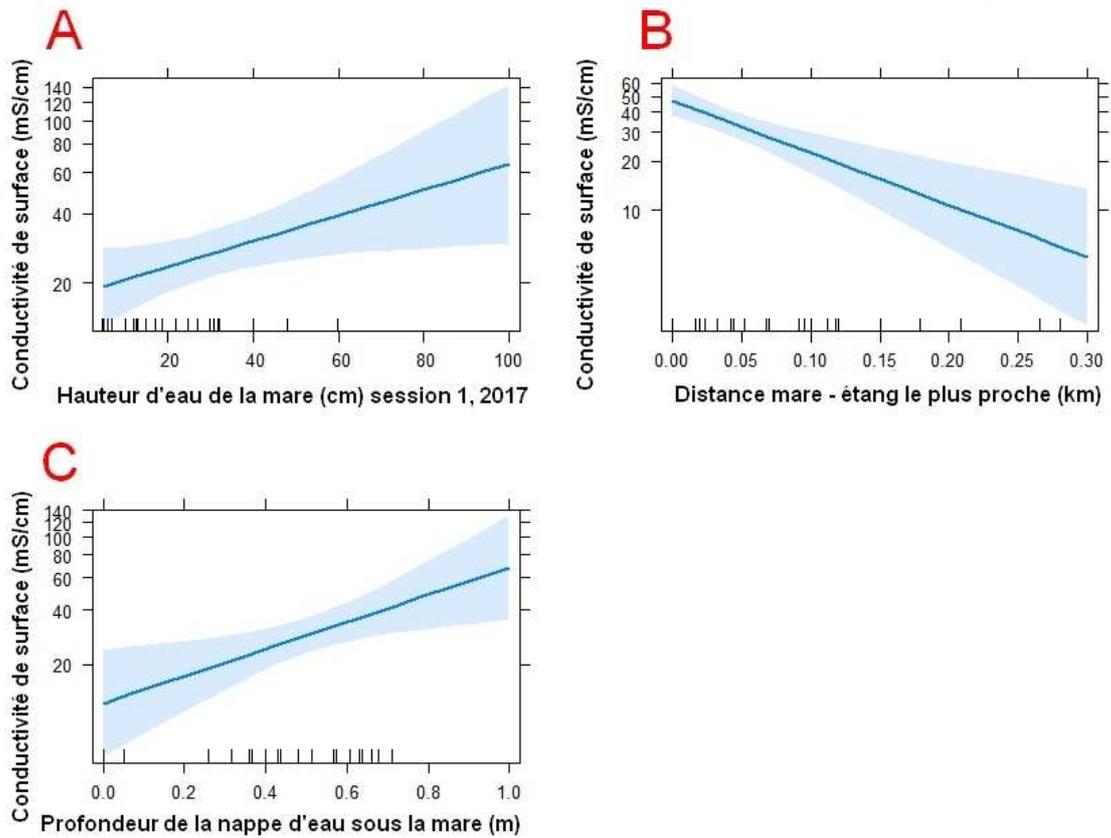


Figure 11. Conductivité des mares en fonction A) de la hauteur d'eau de la mare, B) de la distance à l'étang le plus proche, et C) de la profondeur de la nappe d'eau sous la mare. *Les intervalles de confiance sont représentés par des bandes bleu clair.*

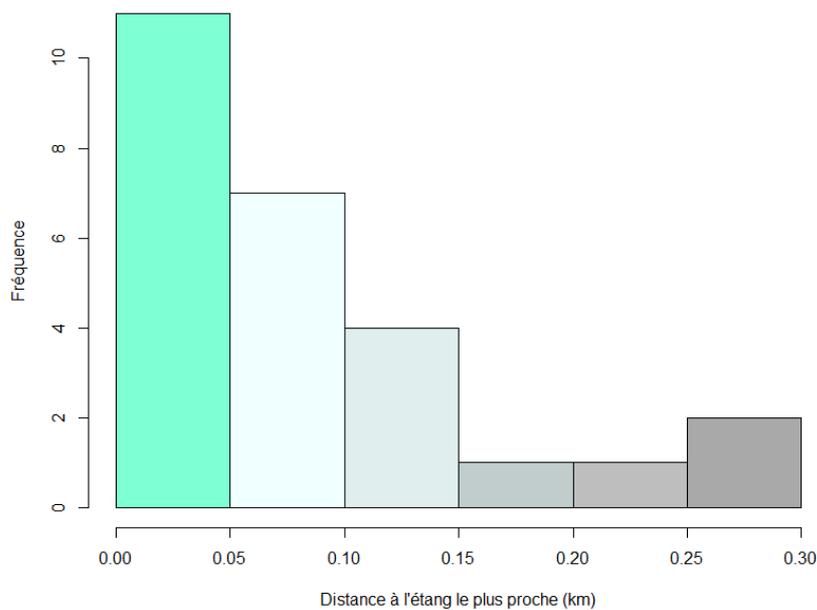


Figure 12. Histogramme des fréquences de distances entre les mares et les étangs les plus proches (km).

Globalement, les MTL sont proches, voire en dessous du niveau moyen de la mer. Le fond des mares est compris entre -0,47 et +0,56 m NGF, pour un niveau marin moyen de 0,18 +/- 0,03 m NGF sur la période considérée. Plus de 60% des mares présentaient une nappe située à une profondeur relative comprise entre 0,34 et 0,69 cm en juillet (Figure 12).

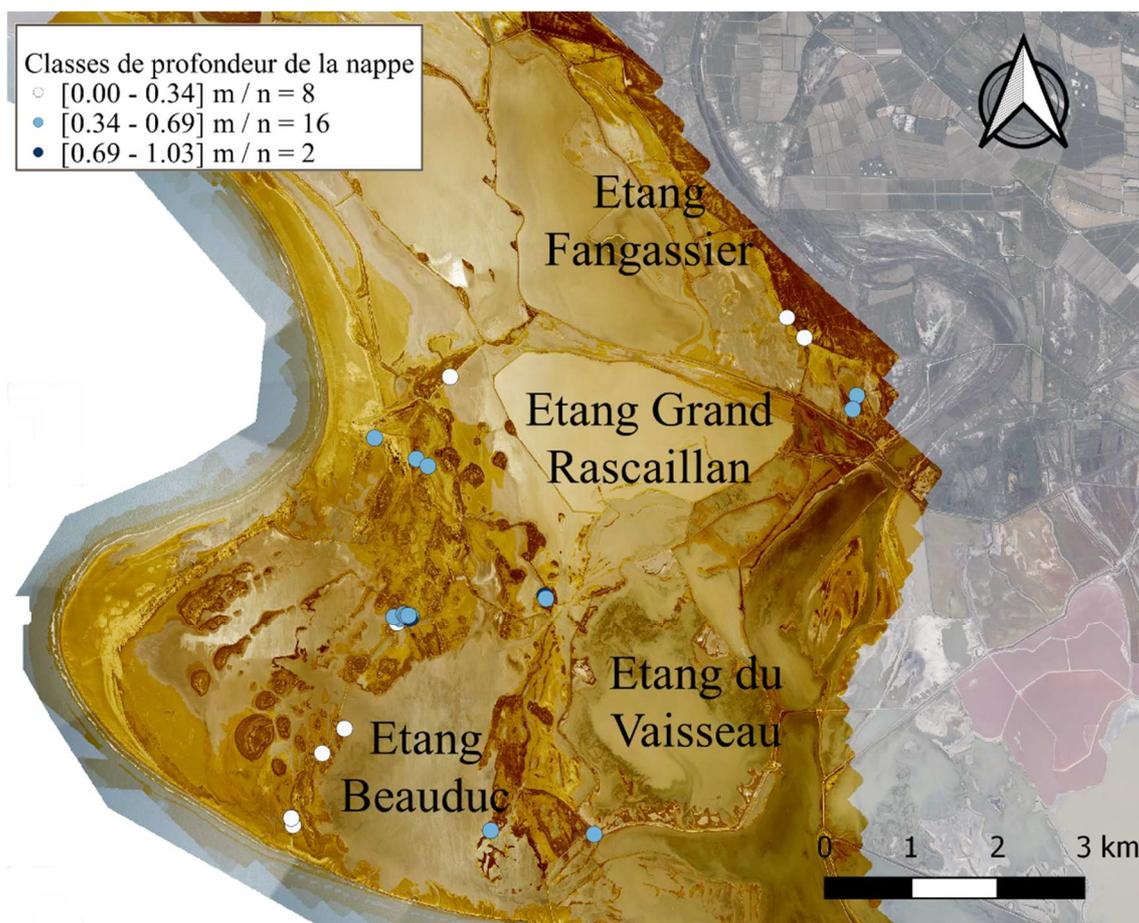


Figure 13. Localisation des 26 MTL utilisées en 2017 pour caractériser l'habitat des crapauds calamites et la profondeur de la nappe associée.

## 1.2.2. Utilisation des mares pour la reproduction du Crapaud calamite

### 1.2.2.1. Occupation des mares temporaires littorales

Nous avons localisé un total de 43 MTL utilisées pour la reproduction par le Crapaud calamite, entre 2015 et 2018 (Figure 14).

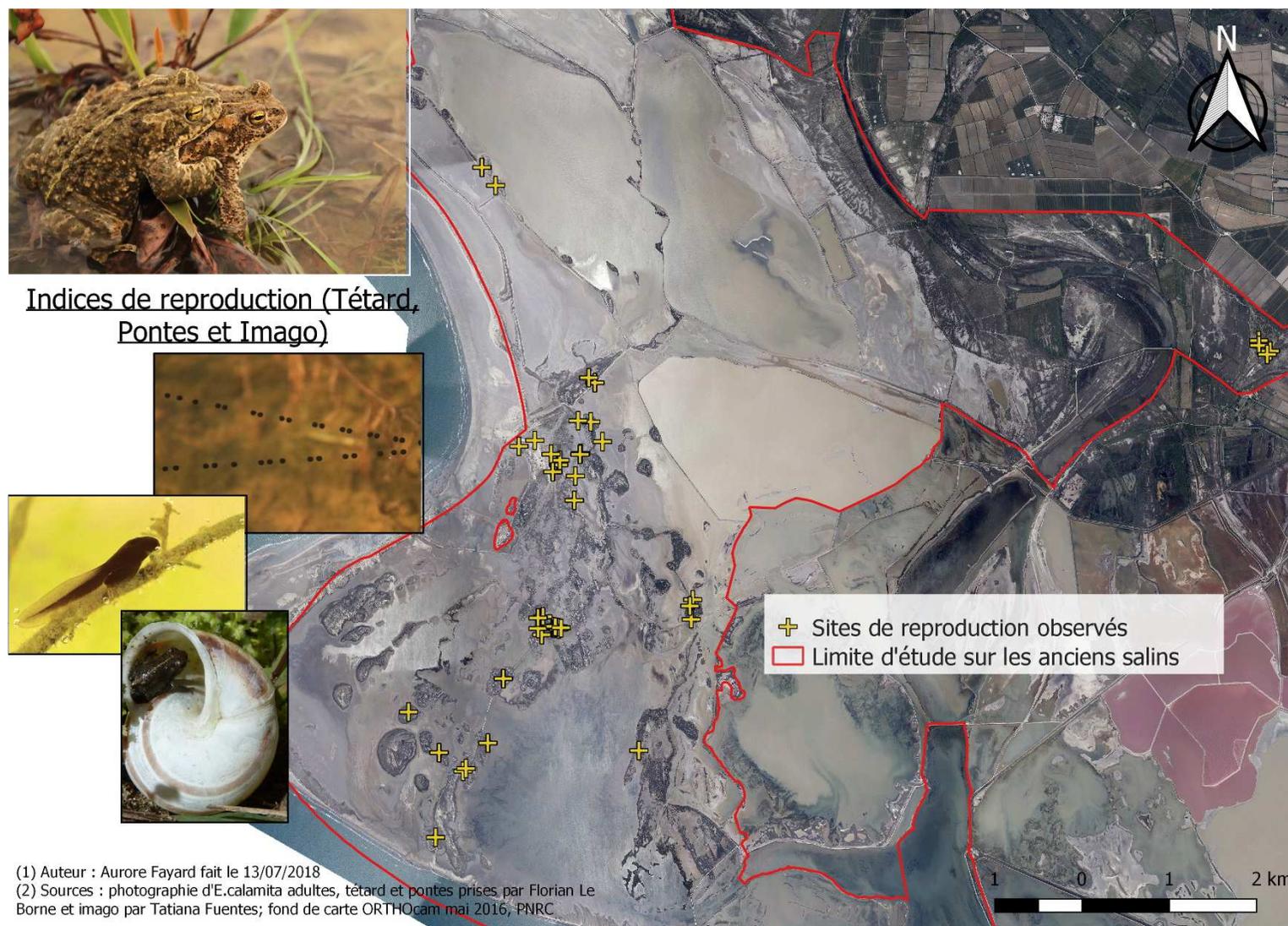


Figure 14. Localisation des MTL présentant des indices de reproduction du Crapaud calamite sur le site des Etangs et marais des salins de Camargue sur la période 2015-2018 (n = 43).

Parmi les trois modèles de *site occupancy* élaborés, le meilleur modèle est celui qui considère que les probabilités de détection diffèrent en fonction des sessions (delta AICc > 2 avec les autres modèles ; Tableau 1).

Tableau 1. Description, formulation, nombre de paramètres, AIC et  $\Delta AICc$  des trois modèles de site occupancy évalués sur les 46 mares des 19 parcelles de 1 ha pré-sélectionnées. Les estimations des taux d'occupations et les probabilités de détection du meilleur modèle sont présentées Figure 16.

Description du modèle	Formulation du modèle dans E-Surge	K	AICc	$\Delta AICc$
Détection en fonction des sessions	$\psi(\text{année}2015)\gamma(\text{année})\varepsilon(\text{année})\rho(\text{sessions})$	10	394,9	
Occupation en fonction de la covariable assèchement+ détection en fonction des années	$\psi(\text{freq\_assèchement})\gamma(\text{année})\varepsilon(\text{année})\rho(\text{année})$	12	411,3	16,3
Détection en fonction des années	$\psi(\text{année}2015)\gamma(\text{année})\varepsilon(\text{année})\rho(\text{année})$	11	412,3	17,4

La majorité des MTL des parcelles présélectionnées ont été observées sèches plus de la moitié des visites. L'utilisation de la fréquence d'assèchement globale des mares suivies (Figure 15) comme covariable explicative de la probabilité d'occupation initiale d'une mare par le crapaud calamite ne permet pas d'améliorer le modèle (Modèle 2, tableau 1, delta AICc = 16,3).

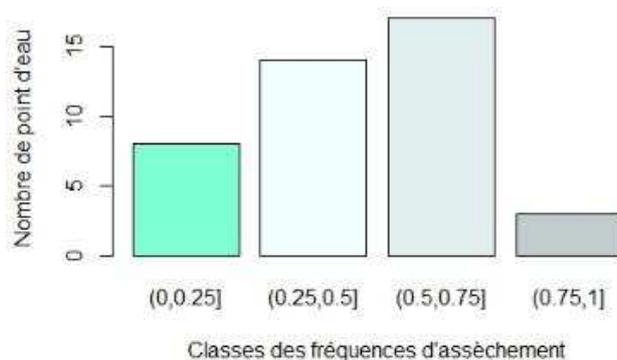


Figure 15. Histogramme des fréquences d'assèchement (nombre de fois que la surface est trouvée sèche sur le total des occasions) des mares littorales temporaires sur parcelles présélectionnées, entre 2015 et 2018. Ces valeurs ont servi de co-variable dans la modélisation site occupancy multi-saisons dynamique.

La probabilité de détection est maximale lors du premier passage, soit entre fin mars et début avril, puis diminue jusqu'au troisième passage, lorsque l'intervalle de confiance à 95% indique un taux de détection variant de 16 à 38 % (Figure 16b).

Le meilleur modèle permet d'estimer que 61% [IC95% 43 à 75%] des mares des EMSC a été utilisé comme habitat de reproduction par les adultes d'*E. calamita* en 2015 (Figure 16a). Au cours des deux années suivantes, ce taux d'occupation diminue en dessous de 40%, pour finalement être presque nul en 2018.

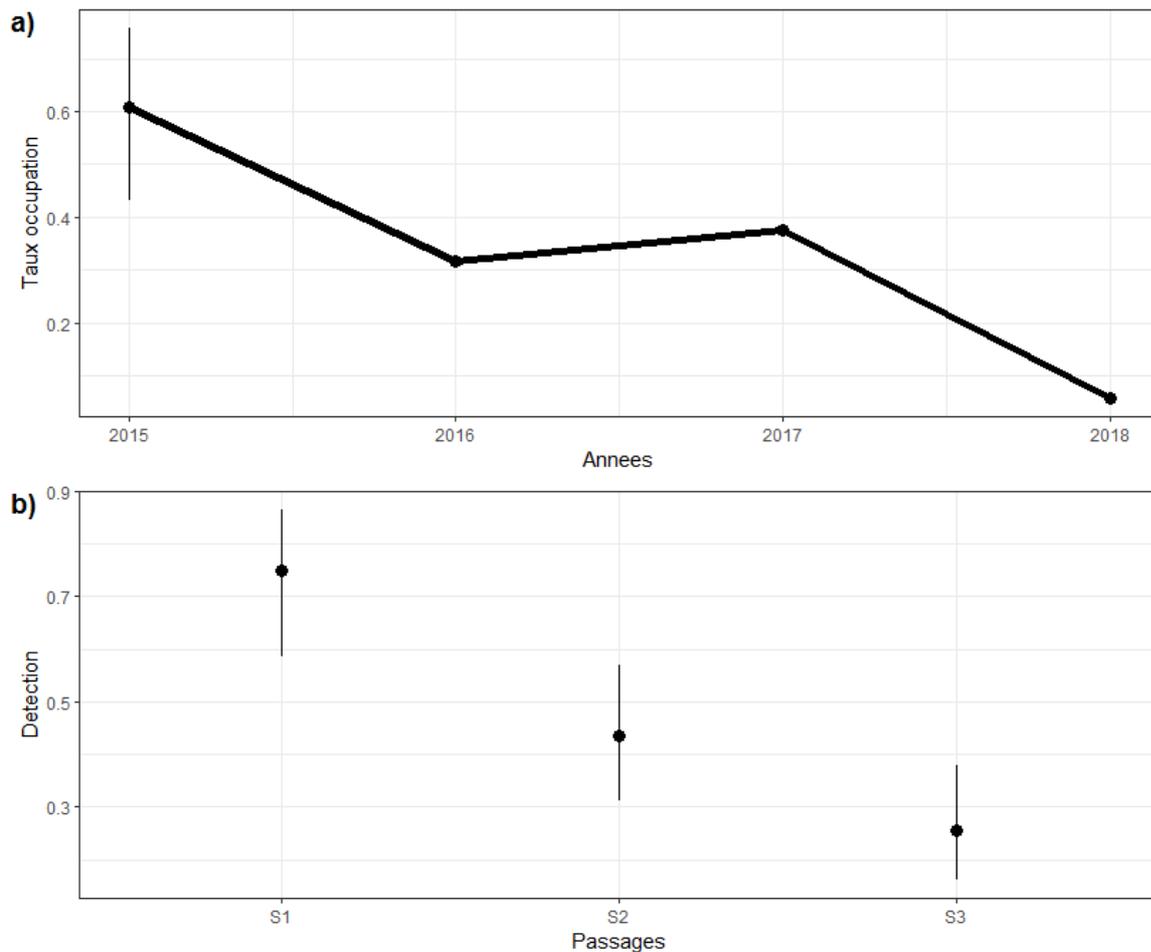


Figure 16. Évolution a) des taux d'occupation des MTL et b) des probabilités de détection des crapauds calamites sur le jeu 46 mares suivies de 2017 à 2019 dans la strate des parcelles présélectionnées. *L'intervalle de confiance est estimé seulement la première année (premier point en a) car les valeurs des années suivantes sont calculées a posteriori en fonction des taux d'extinctions et colonisations interannuels. S1 : de mars à avril, S2 : avril à mai, S3 : mai à juin.*

#### 1.2.2.2. Tolérance au sel du Crapaud calamite

Les prédictions d'osmo-tolérance d'*E. calamita* sont basées sur 409 valeurs de conductivité, dont 91 qui font référence aux observations d'indices de reproduction, toutes années confondues (ce qui inclut têtards, pontes, adultes chanteurs et immatures, qu'ils soient morts ou vivants). Parmi ce jeu de données, environ 44% des observations se rapportaient à des têtards vivants. Le modèle logistique reposant sur les seuls indices de têtards vivants prédit qu'au-delà d'une conductivité de 12 mS.cm, la probabilité de trouver des têtards vivants dans une mare est inférieure à 1% (Figure 17).

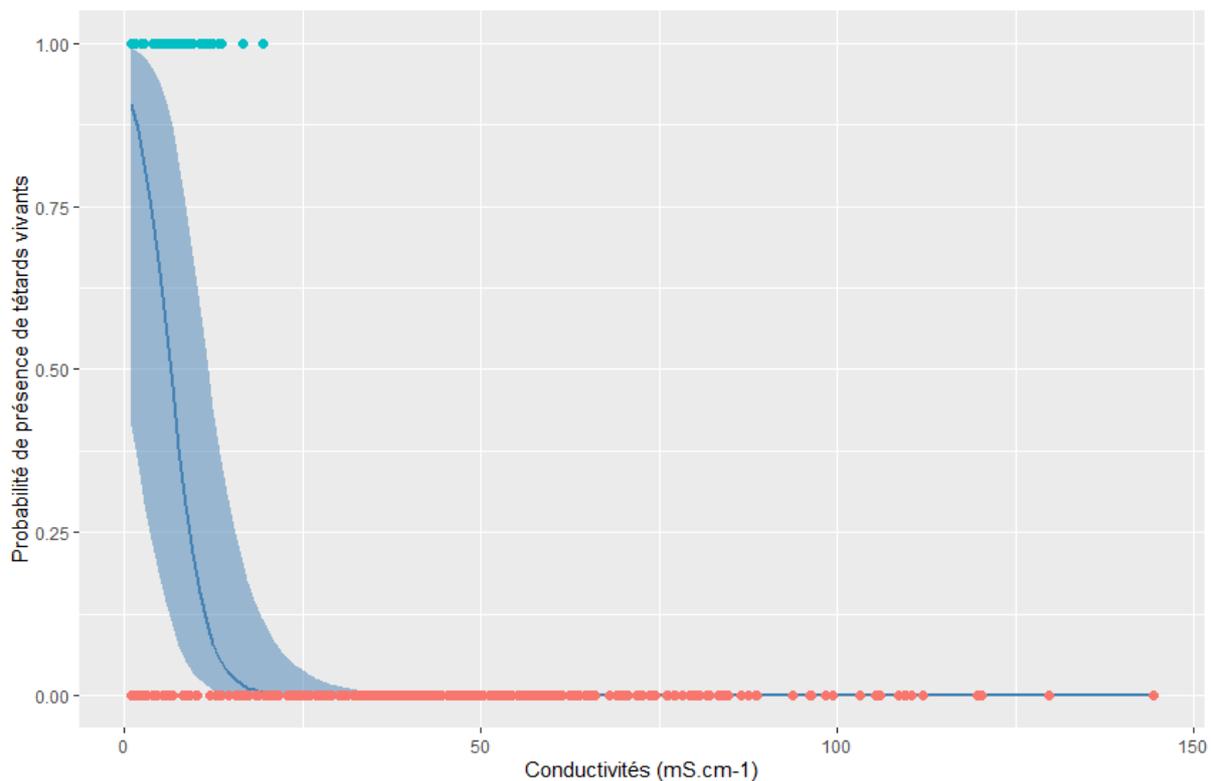


Figure 17. Probabilités de présence d'indices de reproduction d'*E. calamita* en fonction de la conductivité. La courbe bleue décrit la probabilité d'observer des têtards vivants, l'intervalle de confiance à 95% étant représenté par le bandeau de la même couleur de part et d'autres. Les observés sont en vert (présences) et rouge (absences).

### 1.3. Discussion

Nos résultats indiquent qu'en dépit d'un apparent maintien de la disponibilité des MTL dans les EMSC durant les quatre ans de suivi (2015-2018), leur salinisation a progressivement rendu la majorité d'entre elles impropres à la reproduction du Crapaud calamite. En effet, la moindre occupation des MTL par le Crapaud calamite après 2015, suggère que les trois années suivantes étaient défavorables au succès de reproduction de l'espèce. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer ces variations.

Les conditions météorologiques ont été particulières en Camargue entre 2015 et 2018 avec des précipitations annuelles faibles en 2016 et 2017 par rapport à la moyenne calculée entre 1980 et 2018. Cela a réduit l'alimentation en eau douce des mares et pourrait avoir accéléré l'assèchement de ces dernières par évaporation durant la saison de reproduction. Nous avons observé que des pontes et des têtards présents n'ont pas pu achever leur développement à cause d'un assèchement trop précoce, alors qu'*E. calamita* est une espèce pourtant adaptée à des hydropériodes courtes pour se reproduire. Cette adaptation lui permet d'éviter la prédation dans des pièces d'eau plus longtemps mises en eau et colonisées par des poissons, mais aussi d'éviter la compétition avec d'autres espèces d'amphibiens. Les fréquences d'assèchement nous confirment que les MTL présélectionnées ont un régime de mise en eau temporaire, puisque les trois quarts ont été observées sèches plus de trois fois sur les quatre années de suivi.

Une partie des digues situées sur le front de mer qui étaient auparavant entretenues disparaissent progressivement depuis 2010 du fait de l'arrêt de leur entretien et du recul du trait de côte (Figure 18).

Ce phénomène de dépoldérisation a eu pour conséquence de rétablir les connexions directes entre la mer et les lagunes des anciens salins. Les EMSC sont principalement occupés par des lagunes de grande superficie (200 à 500 ha), dont les niveaux d'eau sont devenus beaucoup plus instables que durant l'exploitation salicole et varient maintenant au gré des fluctuations du niveau marin. Il est probable que la mer, en remplissant les étangs lors des tempêtes, provoque la salinisation de l'eau de surface de la plupart des MTL, soit par submersion directe, soit par percolation à travers le substrat sableux des massifs dunaires. La vulnérabilité des mares à la submersion marine est d'autant plus importante sur la zone d'étude qu'elles sont toutes situées dans une gamme d'altitudes (-0,47 à +0,56m NGF) inférieure au niveau marin observé lors des épisodes de surcotes les plus importants (+0,90m NGF et au-delà). La salinisation des mares peut d'autre part être accentuée lors des années sèches par le manque de précipitations et la salinisation de la nappe.



Figure 18. Intrusion marine dans l'étang de Beauduc, favorisée par la fragilisation de la digue de front de mer (photo : M. Thibault).

Comme nous l'avons vu, la reproduction du Crapaud calamite est adaptée à des hydropériodes courtes. En revanche, les têtards sont sensibles aux augmentations du taux de salinité, qui devient impropre à leur survie s'il dépasse 10 PSU. Cela signifie qu'en 2016, plus de la moitié des mares présélectionnées présentaient dès le début de la saison de reproduction une conductivité trop élevée pour la viabilité des têtards, et ce phénomène s'est accentué en 2017 et 2018.

Le seuil de tolérance au sel observé sur les têtards d'*E. calamita* dans les anciens salins est en cohérence avec les résultats obtenus par Barrioz (2016), Gomez-Mestre & Tejedo (2003) et Mathias (1971). Certains auteurs, comme Gomez-Mestre & Tejedo (2004), affirment qu'*E. calamita* est l'une des rares espèces d'amphibiens en Europe à pouvoir se reproduire dans des milieux saumâtres. Ils ont de ce fait étudié la capacité de cette espèce à s'adapter localement au taux de salinité de son milieu de vie. La population des EMSC ferait partie de celles qui sont adaptées aux eaux saumâtres. Les adultes pourraient être moins limités par le sel que les pontes et les têtards. Dans certains cas, ils sélectionneraient des lieux de ponte, qui faute d'autre choix, seraient trop concentrés en sel, ou des mares qui se saliniseraient en cours de saison. Cela expliquerait la présence de pontes non viables observées dans des mares salinisées.

Les faibles altitudes du fond des MTL interrogent sur leur vulnérabilité aux effets des événements de submersions marines et à moyen et long terme face à l'augmentation du niveau de la mer. La population de cet amphibien est localement en danger si le taux de salinité de ses sites de reproduction dépasse son seuil de tolérance de façon définitive.

Si la salinisation des MTL persiste dans les prochaines années, la population pourrait se déplacer pour fuir ce site devenu en grande partie impropre à la reproduction, ou bien s'éteindre. D'après Miaud &

Sanuy (2005), les distances de déplacements pendant la période de reproduction ne dépasseraient pas 500 mètres, et après cette période, les imagos seraient capables de parcourir plus d'un kilomètre et demi. La migration d'une partie de cette population est néanmoins peu probable au vu de l'éloignement des premiers sites propices, situés entre 3 et 5 km. Il pourrait toutefois être envisageable de creuser de nouveaux sites de reproduction sur le secteur de la Belugue, afin d'offrir des mares de replis pour la reproduction de cette espèce. Ce secteur est situé en arrière de la digue à la mer et n'abrite actuellement que très peu de sites de reproduction (hormis au Clos du lièvre).

Enfin, cette étude met en évidence l'intérêt de davantage étudier les phénomènes d'approvisionnement de l'eau de surface ainsi que les propriétés de(s) substrat(s) des MTL afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la dégradation de leur fonctionnalité pour les crapauds calamites. Cela nous permettrait de confirmer l'hypothèse d'une influence de la nappe salée ou des eaux de surfaces des étangs alentours sur l'hydrologie des mares.

### **Discussion méthodologique**

*E. calamita* est une espèce opportuniste, qui est connue pour être fidèle à ses sites de reproduction mais volontiers nomade, se déplaçant facilement lorsque les conditions deviennent défavorables (Graitson *et al.* 2007), ce qui va dans le sens du choix d'un échantillonnage aléatoire pour la collecte des données. Cette étude ne durant que quatre ans, nous ne pouvions pas non plus nous permettre de ne faire que des tirages aléatoires, au risque de trouver un nombre non significatif de sites de reproduction. Le meilleur compromis était donc de coupler ces deux méthodes d'échantillonnage.

Nos analyses ont été menées en tenant compte du biais possible résultant d'une probabilité de détection imparfaite, un des problèmes les plus courants en biologie de la conservation (MacKenzie *et al.* 2017). La modélisation en présence-absence des batraciens est fréquente (Cayuela *et al.* 2012 ; Weir *et al.* 2005).

La poursuite de cette étude nous paraît souhaitable avec pour objectif principal d'évaluer la dynamique et les capacités de résilience des MTL des étangs et marais des anciens salins de Camargue, face à une probable marinisation de ce territoire. Il serait également intéressant d'étudier la capacité des crapauds calamites à se replier plus au nord ou à l'est dans des secteurs plus doux, toutefois cette question nécessiterait une étude dédiée de tout autre envergure que nous ne discuterons pas ici.

Les propositions qui suivent pourront servir de base à la poursuite de la collecte de données dans le cadre du suivi des populations dans les EMSC.

Tout d'abord, il serait utile d'installer une station météorologique sur le site, car la pluviométrie peut varier sensiblement entre la station Météo France de la Tour du Valat et le site d'étude (situé entre 11 et 17 km de distance), ce qui affaiblit la robustesse de nos interprétations.

Echantillonner 47 parcelles chaque année demande beaucoup de temps et l'expérience de ces quatre années nous laisse penser que nous ne pourrions pas poursuivre cet effort à moyen terme. Il nous semble primordial de poursuivre annuellement le suivi sur des 25 parcelles présélectionnées ce qui permet de maintenir un effort d'échantillonnage raisonnable sur le long terme. Le choix de travailler à l'échelle de parcelles plutôt que de mares nous permettra de détecter de nouvelles mares utilisées pour la reproduction et d'observer d'éventuelles extinctions locales. Globalement, ce suivi, même limité à ces parcelles présélectionnées, devrait nous permettre de mesurer la capacité de résilience des EMSC aux épisodes de marinisation.

Néanmoins, nous préconisons d'essayer de profiter des années très favorables à la reproduction du Crapaud calamite (fort cumul pluviométrique hivernal) afin d'augmenter les chances de détecter de nouveaux sites de reproduction.

Un test de puissance pourrait être mené afin de vérifier quelle tendance à la hausse ou à la baisse de la population de crapaud calamite ce protocole permet de détecter.

Pour pallier au problème de standardisation de la superficie des mares, un logiciel commun de calcul pourrait être imposé lors de la saisie des résultats (par exemple un logiciel SIG, ou bien via GoogleEarth Pro). Cette variable pourrait alors être prise en compte pour calculer les facteurs de connectivité des mares du site.

Enfin nous avons évoqué l'utilité de suivre cette population par une méthode complémentaire. Le dénombrement nocturne par *distance sampling* permet notamment d'estimer la densité d'une population. Il serait intéressant de l'envisager pour discuter de la structure et des tendances des effectifs de la population de Crapaud calamite.

#### Les limites retenues :

- Le protocole est mis en œuvre au printemps ; cependant, l'espèce étudiée est documentée comme pouvant avoir également une reproduction automnale en région Méditerranéenne.
- Nous ne savons pas réellement combien de sites principaux de reproduction demeurent inconnus sur les EMSC.
- Le succès de reproduction n'a pas pu être évalué de façon fiable à cause du faible nombre d'observations d'imagos. Une raison dans notre cas est probablement le très faible succès de reproduction sur 3 des 4 années du suivi (2016 à 2018).
- L'impact de la dégradation de la qualité des sites de reproduction sur la dynamique de cette population n'est actuellement pas quantifiable.

#### Les améliorations et propositions de solutions aux limites :

- Si l'étude se poursuit avec un nombre plus réduit d'observateurs, il est nécessaire d'alléger le protocole, en particulier en le focalisant sur le suivi des parcelles présélectionnées.
- Effectuer un test de puissance sur les données de présence/absence des mares avec présence de Crapaud calamite permettra d'évaluer la capacité du protocole à détecter des tendances à la hausse ou à la baisse des populations de crapaud calamite.
- Ajouter une session de terrain en automne (seulement les années avec des précipitations automnales suffisamment importantes pour une reproduction potentielle) sur un échantillon réduit de mares permettrait de savoir si une seconde reproduction annuelle de l'espèce intervient à cette période.
- Estimation du succès de reproduction: il serait intéressant à l'avenir de former les observateurs à la recherche des imagos (qui restent en bordure des mares après l'émergence) lorsque leur présence est envisagée (présence de têtards lors des sessions précédentes, faible salinité de la mare).
- Nous préconisons la mise en place d'un suivi automnal de la population par dénombrement nocturne des imagos en phase terrestre (*distance sampling*) afin d'estimer différents paramètres démographique (âge-ratio, sex-ratio, densité). Si le degré d'activité ne varie pas entre ces différentes classes d'individus alors cette méthodologie sera pertinente pour estimer leur densité respective.

## 2. Enquête auprès de gestionnaires d'espaces naturels protégés

### 2.1. Objectifs

Une enquête a été réalisée auprès d'un échantillon de gestionnaires d'espaces naturels, dans l'objectif d'acquérir des connaissances sur la problématique de salinisation des sites de reproduction des amphibiens situés sur le littoral méditerranéen et d'évaluer le potentiel d'utilisation du Crapaud calamite ou d'autres amphibiens comme indicateur de l'évolution des mares.

### 2.2. Méthodologie

L'enquête a été réalisée sous la forme d'entretiens téléphoniques conduits auprès de personnes en charge de la gestion ou de suivi écologique, sur un échantillon de sites du pourtour Méditerranéen en régions Occitanie et Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (Sud PACA).

Les questions posées étaient les suivantes :

1. Sur les espaces littoraux que vous gérez ou suivez, des amphibiens sont-ils présents ? Si oui, quelles sont les espèces présentes ?
2. [Si la réponse à la question 1 est non, passer à la question 3.]  
Avez-vous sur vos espaces littoraux et péri-lagunaires, effectué des inventaires ou des suivis de sites de reproduction des amphibiens ? Si oui à l'aide de quel(s) protocole(s) ? Avez-vous également effectué des mesures de paramètres environnementaux (ex : niveau d'eau, salinité) ?
3. Avez-vous connaissance d'extinctions locales connues ou suspectées de ces amphibiens ? Si oui, connaissez-vous les causes de ces disparitions ?
4. De votre point de vue de gestionnaire, est-ce que la salinisation des mares littorales est un enjeu à prendre en compte sur le / les site(s) sur le(s)quel(s) vous intervenez ?
5. Seriez-vous intéressé par la mise en place d'un suivi pluri-annuel des mares occupées par les amphibiens, afin de déterminer si ces milieux sont exposés à un risque de salinisation ?

### 2.3. Résultats

#### 2.3.1. Résultats généraux

L'enquête a été réalisée auprès de 14 personnes représentant 13 organismes gestionnaires ou en charge de suivis de sites (tableau 2). Elle a permis de rassembler des informations sur 15 sites ou ensembles de sites situés en Région Occitanie et 5 situés en Région Sud PACA, avec en complément, des informations disponibles pour le site des Etangs et marais des salins de Camargue.

Tableau 2 : Liste des sites, des organismes et des personnes ayant participé à l'enquête

Sites	Organismes	Personnes enquêtées
<b>Région Occitanie</b>		
Anse de Paulilles (Port-Vendres, 66)	CD des Pyrénées-Orientales	Matthieu Nivet (Garde du littoral)
Lido de Bourdigou (Torreilles, 66)	Perpignan Méditerranée Communauté d'Agglomération	Roland Mivière (Technicien gestion des espaces naturels)
Lido de l'étang du Canet (Canet-en-Roussillon et Saint-Nazaire, 66)		
Zones humides de l'étang de Salses (11)	Mairie de Leucate	Julien Robert (Chargé de mission)
Zones humides de la Narbonnaise (11)	PNR de la Narbonnaise	Kattalin Fortuné-Sans (Chef de service) et Sylvain Nicolas (Garde du littoral)
Réserve africaine de Sigean (Sigean, 11)	La Réserve africaine de Sigean	Antoine Joris (Directeur)
Basse plaine de l'Aude (Fleury-d'Aude et Vendres, 11-34)	Conservatoire d'Espaces Naturels d'Occitanie	Rémi Jullian (Chargé de projet)
RNN du Bagnas (Marseillan et Agde, 34)	Association ADENA	Julie Bertrand (Directrice)
Massif de la Gardiole (34)	Conservatoire d'Espaces Naturels d'Occitanie	Rémi Jullian (Chargé de projet)
Salins de Villeneuve (Villeneuve lès Maguelone, 34)		
Lido de l'étang de l'Or et Grand Travers (Mauguio et La Grande-Motte, 34)		
Bois du Boucanet (Grau-du-Roi, 30)		
L'Espiguette, Terre-neuve & Capelude (Grau- du-Roi, 30)		
Marais périphériques de l'étang de l'Or (Mauguio, Candillargues et Lansargues, 34)	Pays de l'Or Agglomération	Jonathan Fuster (Garde du littoral)
La Marette (Aigues-Mortes, 30)	Syndicat Mixte de Gestion de Camargue Gardoise	Florine Escot (gestionnaire et animatrice de la Maison du Grand Site)
<b>Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur</b>		
RNN Camargue (Arles et Les Saintes-Maries- de-la-Mer, 13)	Société nationale de protection de la nature	Yves Chérain (Chargé de mission scientifique)
They de Roustan (Port-Saint-Louis-du-Rhône, 13)	Parc naturel régional de Camargue	Claire Tétrel (Chargée de mission)
Domaine de la Palissade (Arles, 13)		
Cordon du Jaï & Etang du Bolmon, (Marignane et Châteauneuf-les-Martigues, 13)	Métropole Aix-Marseille- Provence	Elodie Gerbeau (Chef de projet)
Etang de Villepey (Villepey, 83)	Ville de Fréjus	Alain Abba (Garde du littoral)

### 2.3.2. Connaissances par les gestionnaires des amphibiens présents sur les sites littoraux et péri-littoraux

Des informations sur les espèces présentes ont été fournies par les organismes gestionnaires ou chargés de suivi pour 20 sites ou groupes de sites (cf. tableau 3).

Pour une grande majorité des personnes contactées, les connaissances d'inventaires d'amphibiens (présence / absence des espèces) sur les sites dont elles ont la charge sont considérées comme étant globalement satisfaisantes. Ces sites sont : Anse de Paulilles, Lido de Torreilles et Bourdigou, Zones humides de l'étang de Salses (seulement pour le site de la Sagnette), zones humides de la Narbonnaise, basse plaine de l'Aude, RNN Bagnas, salins de Villeneuve, massif de la Gardiole, lido de l'étang de l'Or et du Grand Travers, Bois du Boucanet, l'Espiguette (incluant Terre-neuve et Capelude), RNN Camargue, Etangs et marais des salins de Camargue, They de Roustan, domaine de la Palissade.

Sur cinq sites ou groupes de sites, les connaissances d'inventaires sont basées sur des données ponctuelles ou jugées incomplètes : Canet-Saint-Nazaire, Réserve africaine de Sigean (mais un inventaire est prévu à l'avenir), marais périphériques au nord de l'étang de l'Or, Cordon du Jaï – Etang du Bolmon (compilation de données d'amateurs), Etang de Villepey.

D'après les informations obtenues, 12 taxons au total sont présents sur l'ensemble des sites enquêtés. La Rainette méridionale (16 sites), les grenouilles du genre *Pelophylax* (15 sites, tous taxons confondus) et le Crapaud calamite (13 sites) sont les taxons les plus fréquemment mentionnés. L'Alyte accoucheur n'est signalé que sur un site (zones humides de la Narbonnaise). Pour plusieurs sites ou groupes de sites, les informations sont certainement partielles. Par exemple, la Rainette méridionale est probablement présente sur une partie des sites où l'espèce n'a pas été mentionnée. Il en va probablement de même pour le groupe des grenouilles vertes du genre *Pelophylax* qui est représenté en France méditerranéenne par trois taxons (Grenouille rieuse *P. ridibundus*, Grenouille de Pérez *P. perezi*, Grenouille de Graaf *P. kl. grafi*). Sur plusieurs sites, la présence de grenouilles se rattachant à ce groupe est mentionnée pour plusieurs sites sans que les taxons présents ne soient connus précisément, du fait notamment des difficultés de détermination.

Tableau 3 : Présence / absence des amphibiens sur un échantillon de sites littoraux de Languedoc-Roussillon et de Provence-Côte d'Azur, à partir des informations fournies lors de l'enquête

	Rainette méridionale	Grenouille de Graf	Grenouille de Pérez	Groupe grenouilles rieuse	Alyte accoucheur	Discoglose vertes	Crapaud peint	Crapaud calamite	Pélobate épineux	Pélobate cultripède	Triton palmé	Triton ponctué	Triton marbré
Anse de Paulilles (66)									✓				
Lido de Bourdigou (66)										✓			
Lido de l'étang du Canet (06)									✓				
La Sagnette (ZH étang de Salses) (11)	✓			✓									
ZH de la Narbonnaise (11)	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Réserve africaine de Sigean (11)	✓						✓	✓	✓				✓
Basse plaine de l'Aude (11-34)	✓							✓	✓	✓	✓		✓
RNN du Bagnas (34)	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓
Massif de la Gardiole & Creux de Miège (34)	✓	✓	✓	✓									✓
Salins de Villeneuve (34)	✓	✓	✓	✓				✓					✓
Lido Etang de l'Or / Grand Travers (34)					✓				✓	✓	✓	✓	✓
Zones humides au Nord de l'étang de l'Or (34)	✓								✓		✓		
Bois du Boucanet (30)	✓				✓				✓		✓		✓
L'Espiguette, Terre-neuve & Capelude (30)	✓	✓	✓	✓					✓		✓	✓	
RNN Camargue (13)	✓	✓	✓	✓	✓				✓		✓	✓	
Etangs et marais des salins de Camargue (13)	✓	✓	✓	✓	✓				✓			*	
They de Roustan (13)	✓						✓						
Domaine de la Palissade (13)	✓	✓	✓	✓					✓	✓			✓
Cordon du Jäi et Etang du Bolmon (13)	✓				✓				*	✓	*		
Etang de Villepey (83)	✓				✓				✓	✓			✓

\* Présence historique ou à proximité du site

Le tableau 4 permet de se faire un aperçu des enjeux patrimoniaux constitués par les amphibiens associés aux mares des plaines du littoral Méditerranéen. Il est à noter cependant qu'il n'existe pas encore de liste rouge pour la région Occitanie.

Globalement, les espèces constituant les enjeux patrimoniaux les plus importants à l'échelle du réseau de sites enquêtés sont le Pélobate cultripède (signalé sur 8 sites, auxquels s'ajoutent 2 sites où l'extinction locale est suspectée), la Grenouille de Graf (au moins 8 sites), la Grenouille de Pérez (au moins 9 sites) et le Triton marbré (3 sites).

Par ailleurs, certains taxons bien qu'étant évalués en « Préoccupation mineure » y compris à l'échelle régionale, peuvent dans une certaine mesure représenter un enjeu local. C'est le cas par exemple du Crapaud calamite, dont il existe sur les Etangs et marais des salins de Camargue une population importante à l'échelle du delta du Rhône, ou bien du Pélobate ponctué qui, sur certains secteurs littoraux, peut être rare ou localisé.

Tableau 4 : Synthèse de la valeur patrimoniale des amphibiens présents dans les plaines littorales de Languedoc-Roussillon et de Provence-Côte d'Azur.

	Protection nationale	Annexe IV Dir. Habitats	Liste rouge PACA	Liste rouge France	Liste rouge mondiale
Rainette méridionale	✓	✓	LC	LC	LC
Grenouille de Graf	✓		NT	NT	NA
Grenouille de Pérez	✓		NT	NT	LC
Grenouille rieuse	✓		NA	LC	LC
Alyte accoucheur	✓	✓	LC	LC	LC
Discoglosse peint	✓	✓	absent PACA	NA	LC
Crapaud calamite	✓	✓	LC	LC	LC
Crapaud épineux	✓		NA	NA	NA
Pélobate cultripède	✓	✓	EN	VU	NT
Pélodyte ponctué	✓		LC	LC	LC
Triton palmé	✓		NT	LC	LC
Triton marbré	✓	✓	absent PACA	NT	LC

EN	En Danger
VU	Vulnérable
NT	Quasi-menacé
LC	Préoccupation mineure
NA	Non évalué

### 2.3.3. Les suivis réalisés sur les sites

Sur les 20 sites ou groupes de sites enquêtés, 9 font ou ont fait l'objet ces dernières années de suivis ciblant une ou plusieurs espèces d'amphibiens, avec une grande diversité de protocoles mis en œuvre.

Sur le site de la RNN du Bagnas, l'association ADENA a réalisé un suivi du Pélobate cultripède en 2014-2016. Le protocole POPAmphibien (Barrioz & Miaud 2016) a été mis en œuvre, couplé avec un autre protocole pour l'observation des pontes. En raison d'un phénomène de salinisation suspecté sur plusieurs mares temporaires, des relevés physiques ont également été mis en place. Le protocole POPAmphibien propose deux approches, l'une portant sur le suivi de l'occurrence des communautés d'amphibiens et l'autre sur le suivi de l'occurrence et de l'abondance d'espèces cibles. Pour le premier protocole, l'objectif général est de suivre les évolutions de l'état de la batrachofaune à partir de l'estimation de l'occurrence des communautés d'amphibiens dans les sites aquatiques. Il prévoit trois sessions de terrain en période de reproduction (de nuit ou de jour selon les sessions), sur des sites de reproduction pré-identifiés. Le second protocole est ciblé sur les tritons et préconise l'emploi de nasses.

Le CEN-Occitanie et ses collaborateurs (P. Priol, V. Fradet) suivent de nombreux sites : basse plaine de l'Aude, massif de la Gardiole, salin de Villeneuve, lido de l'étang de l'Or et du Grand Travers, bois du Boucanet et l'Espiguette. Les protocoles sont différents selon les sites et sont conçus au cas par cas, en fonction des objectifs poursuivis mais aussi des observateurs assurant leur mise en œuvre.

Sur le site du Grand Travers, 15 mares ont été étudiées en 2013 et 18 ont été suivies en 2016 (CEN L-R 2016). Un suivi similaire mais portant sur une quarantaine de mares est mis en œuvre au bois du Boucanet. Le protocole est standardisé dans l'objectif de comparer dans le temps les données

collectées lors de son application (méthode des indices horaire d'abondance). Pour chaque mare étudiée, deux échelles spatiales de suivi sont définies :

- la placette de prospection (buffer de 50 m, correspondant à un cercle de 50m de rayon) : sur chaque placette, une recherche à vue des individus en déplacement est réalisée pendant 15 minutes par deux observateurs ;
- la mare : une recherche à vue (10 minutes pour 2 observateurs) et à l'épuisette est réalisée, ainsi qu'une évaluation de l'état de conservation de l'habitat de reproduction en tant qu'habitat d'espèce, à l'aide d'une grille élaborée par le CEN L-R.

Trois épisodes de prospection sont définis : un passage nocturne visant les adultes en phase de reproduction en mars, un passage nocturne visant les adultes et les larves lors des premiers stades en avril, un passage diurne à l'épuisette visant les larves lors de stades de développement avancés (indice de reproduction avérée) en mai. Le protocole mis en œuvre jusqu'à présent ne prévoit pas de mesures de niveau et de salinité. Cependant, il est envisagé de mettre en place un suivi précis de l'hydro-période des mares en lien avec un suivi piézométrique du niveau et de la salinité de la nappe (CEN L.-R. 2016).

Au domaine de la Palissade, le Parc naturel régional de Camargue avait réalisé un suivi des mares durant quatre ans, de 2010 à 2013 ; ce suivi n'a pas été renouvelé par la suite.

L'étang de Villepey ne fait pas l'objet de suivi en tant que tel. Cependant, des prospections ciblées sont réalisées en saison de reproduction.

Sur les marais périphériques à l'étang de l'Or, la mise en place d'un suivi était envisagée à partir de 2019.

#### 2.3.4. Connaissances de phénomènes d'extinction locale

D'après les gestionnaires contactés, sur les 20 sites ou groupes de sites étudiés, 7 sont concernés par des phénomènes d'extinction locale, avérée ou suspectée. Ces phénomènes concernent le Pélobate cultripède (4 sites), le Pélodyte ponctué (Palissade), la Salamandre tachetée (Villepey) et un triton indéterminé (lido du Canet et St-Nazaire). 7 autres sites ou groupes de sites n'ont pas connu, selon les personnes contactées, d'extinction contemporaine d'amphibiens. Pour les 6 sites restant, les personnes contactées ne savaient pas si des extinctions locales d'amphibiens étaient avérées ou suspectées.

Sur la RNN du Bagnas, il n'y a pas eu d'observation de reproduction du Pélobate cultripède depuis une dizaine d'années, malgré un effort important de prospection et de suivi. Cette disparition est attribuée à la salinisation des anciens sites de reproduction connus. Sur les salins de Villeneuve, le Pélobate n'a pas été vu depuis « de nombreuses années » et son extinction locale est suspectée. Sur la RNN Camargue, il n'a pas été contacté depuis plus de 10 ans. Enfin, sur le site des Etangs et marais des salins de Camargue, le Pélobate cultripède avait été signalé au début des années 70 dans les dunes de Beauduc, mais n'a pas été retrouvé depuis malgré de nombreuses prospections réalisées au cours des 10 dernières années. Ce dernier site ne semble plus accueillir de mares de reproduction répondant aux exigences écologiques de l'espèce (très faible salinité et longue hydropériode). Le Pélobate avait été signalé dans des massifs dunaires ayant subi dans les années 60 d'importants travaux de terrassement en lien avec l'aménagement et la maintenance de la prise d'eau de mer du salin de Giraud. Une hypothèse est que ces travaux auraient provoqué la destruction ou l'altération de sites de reproduction. Une autre hypothèse possible serait une confusion avec le Crapaud calamite, espèce actuellement commune sur le site mais qui n'était pas mentionnée dans les années 60-70 par les observateurs ayant rapporté la présence du Pélobate cultripède.

Au domaine de la Palissade, le Pélodyte ponctué était auparavant présent. Des individus sont encore occasionnellement observés mais il ne semble plus y avoir de reproduction.

A Villepey, il est indiqué qu'une salamandre était présente auparavant mais n'a plus été revue. Le Pélobate cultripède ne semble jamais avoir été vu sur le site mais ailleurs sur Fréjus, le gestionnaire a connaissance d'une mention d'un individu.

Enfin, sur la Réserve africaine de Sigean, le responsable du site s'interroge sur la relation éventuelle entre la forte augmentation d'un prédateur (la Cigogne blanche) et la diminution des amphibiens.

### 2.3.5. Perception de l'enjeu du phénomène de salinisation

Le phénomène de salinisation en lien notamment avec le changement climatique et l'élévation du niveau marin, ainsi que ses effets sur les communautés d'amphibiens, constituent d'après les personnes contactées un enjeu avéré sur 10 sites et un enjeu potentiel sur 4 autres. Seuls deux sites (Anse de Paulilles et lido de Bourdigou dans les Pyrénées-Orientales) ne semblent pas du tout concernés par cet enjeu. Enfin, sur deux autres sites, cet enjeu n'est pas évalué.

Sur les **zones humides de Canet / Saint-Nazaire**, la salinité a augmenté ces dernières années sous l'effet des changements de fonctionnement de la lagune. Des changements de végétation résultant de ce phénomène sont observés, par exemple des habitats de prairies humides ont été localement remplacés par des végétations halophiles. Plusieurs mares se remplissent d'eau saumâtre ou salée lors des submersions intervenant en périodes de crues et/ou de tempêtes marines. La salinisation est considérée comme occasionnant une perte de biodiversité.

Sur les **zones humides de l'étang de Salses-Leucate**, le phénomène de salinisation est également considéré comme constituant un enjeu important. Auparavant l'étang était séparé de la mer par un cordon sableux qui ne s'ouvrait que lors de fortes tempêtes. L'aménagement d'une connexion permanente a provoqué la marinisation de l'étang et la salinisation de zones humides périphériques. Une stratégie est progressivement mise en place dans plusieurs de ces zones humides, afin d'y introduire de l'eau douce artificiellement et repousser la marinisation, notamment dans le cadre de plans de gestion en cours d'élaboration. Il n'y a pas encore de standard fixé pour la valeur de conductivité à atteindre et les quantités d'eau introduites dans les zones humides sont dépendantes des volumes disponibles. Un suivi des salinités réalisé par des prestataires est en partie financé par l'Agence de l'Eau ([https://drive.google.com/file/d/0B2\\_3egSJTGtARkF1a0lzMktmeUk/view](https://drive.google.com/file/d/0B2_3egSJTGtARkF1a0lzMktmeUk/view)). Quatre points sont d'autre part suivis dans l'étang. Plusieurs paramètres dont la salinité sont suivis mensuellement depuis presque 10 ans.

Sur les **zones humides de la Narbonnaise**, la salinisation des sites utilisés par les amphibiens est également considérée comme un enjeu. Un manque de connaissance est relevé, cependant des suivis de paramètres physiques ont été récemment mis en place : salinité (mesurée dans des piézomètres), niveau d'eau.

Sur la **RNN du Bagnas**, le relevé de paramètres physiques a été mis en place sur plusieurs mares temporaires pour lesquelles un phénomène de salinisation était suspecté. Au moins trois mares temporaires se sont fortement salinisées et ce phénomène est antérieur à 2015. Depuis, deux nouvelles mares temporaires ont été aménagées ; leur situation (localisation, altitude) les protège actuellement des phénomènes d'intrusion marine et de salinisation. Suite aux précipitations automnales, des amphibiens se sont reproduits dans l'une d'entre elles au printemps 2018, mais le Pélobate cultripède n'a pas encore été revu. Une étude a été menée sur deux mares dans le cadre

d'une collaboration entre l'ADENA, la Tour du Valat et l'Université d'Aix-Marseille, afin de comprendre comment celles-ci sont alimentées en eau.

Sur les sites languedociens suivis par le CEN-Occitanie, l'enjeu de salinisation est considéré le plus important, dans l'ordre décroissant, sur les mares du lido de l'étang de l'Or / Grand Travers, puis sur les salins de Villeneuve (malgré son éloignement à la mer), au bois du Boucanet et enfin sur les sites de l'Espiguette. Les mares du **lido de l'étang de l'Or / Grand Travers** sont considérées comme présentant un risque élevé de salinisation notamment en raison de la présence de deux roubines d'eau saumâtre traversant le site ; une salinisation importante d'une partie des mares est constatée depuis quelques années. Les **salins de Villeneuve** bénéficient d'apports d'eau douce, cependant le phénomène de salinisation est à surveiller. Au **bois du Boucanet**, où un suivi de la conductivité est réalisé sur plusieurs mares créées ou restaurées, l'apport artificiel d'eau douce limite le risque de salinisation des mares utilisées pour la reproduction par le Pélobate cultripède. Par contre, sur d'autres mares qui sont utilisées pour la reproduction par une importante population de Crapaud calamite, une tendance à la salinisation est observée. Sur les sites de **l'Espiguette**, un risque à long terme de salinisation de la nappe d'eau douce existe également selon le CEN-Occitanie.

Sur le site de **la Marette**, le Syndicat Mixte de Gestion de Camargue Gardoise constate un phénomène de salinisation attribué à l'évolution du réseau hydraulique. Cette évolution est considérée comme étant naturelle et attendue.

A **l'étang de Villepey**, un phénomène de salinisation brutale a été observé en lien avec des inondations exceptionnelles intervenues en 2010, affectant des espèces peu halo-tolérantes comme la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*). De nouvelles mares ont été créées afin d'offrir un habitat de substitution pour cette espèce.

Sur le site du **cordon du Jaï et de l'étang du Bolmon**, une remontée du biseau salé est détectée. Un phénomène de salinisation important est observé sur plusieurs marais, avec des valeurs pouvant atteindre 28 g/L. Des remontées de sel sont constatées ainsi que l'apparition de végétaux halophiles sur les prairies humides.

Sur la **Réserve africaine de Sigean**, l'évolution des salinités n'est pas suivie mais le phénomène de salinisation est identifié comme un risque potentiel qui pourrait affecter une partie du site. Celui-ci présente une diversité de conditions environnementales, incluant des mares d'eau douce et des mares très salées en particulier à proximité de l'étang de Bages-Sigean.

Sur le **domaine de la Palissade**, plusieurs mares utilisées pour la reproduction par les amphibiens sont suivies. Les valeurs de salinité sont faibles (0-5 g/L) malgré la proximité de l'embouchure du Rhône et de la mer, ce qui s'expliquerait par l'influence du Rhône qui est très proche. Actuellement la salinisation ne constitue pas un enjeu pour les amphibiens se reproduisant dans ces mares.

Sur le site de **l'Anse de Paulilles**, des relevés réalisés tous les mois depuis 10 ans sur quatre puits montrent que la nappe est très peu profonde et que malgré la proximité de la mer, il n'y a pas de phénomène de salinisation.

Sur le site **Torreilles / lido de Bourdigou**, les mesures réalisées dans les mares dunaires ne montrent pas de phénomène de salinisation. L'eau des mares est douce et il ne semble pas y avoir de problématique de salinisation des nappes par la mer.

### 2.3.6. Faisabilité et pertinence de la mise en place d'un indicateur commun

Seules quelques personnes ont exprimé un intérêt pour le développement et la mise en place d'un protocole commun visant à moyen terme le suivi d'un indicateur. Le site de l'Espiguette est identifié par le CEN L-R comme étant le plus intéressant pour la mise en place d'un tel protocole qui ciblerait le Crapaud calamite. Le site des zones humides de l'Etang de Salses et le Bolmon sont d'autres sites identifiés comme présentant éventuellement un intérêt pour la mise en place d'un protocole commun.

Plusieurs personnes consultées ont indiqué que la mise en place d'un suivi ne constitue pas une priorité, dans la mesure où sur leurs sites d'intervention, les enjeux de conservation associés aux amphibiens sont faibles ou modérés. Le site des étangs et marais des salins de Camargue et la RNN du Bagnas sont actuellement les deux seuls sites combinant à court terme un facteur de pression important (salinisation) et un enjeu dûment identifié de conservation des amphibiens, ayant motivé l'acquisition de connaissances à la fois sur les amphibiens et sur l'hydrologie des mares.

Une contrainte posée par l'adoption d'un protocole commun sur les sites disposant déjà d'un suivi, concerne la difficulté d'assurer la continuité de l'analyse des données si le protocole évolue dans le temps.

Le protocole de site-occupancy mis en place sur les Etangs et marais des salins de Camargue, incluant le recueil de données sur des parcelles dont une partie sont tirées au sort, a été conçu afin de répondre aux spécificités du site. Cette approche par tirage au sort était motivée notamment du fait qu'au lancement de l'étude, les mares littorales n'étaient pas connues de façon exhaustive et parce qu'elle était adaptée sur le long terme, à l'éventualité de création naturelle de nouvelles mares résultant du rétablissement de la dynamique côtière sur le site. Par ailleurs, le nombre important de mares sur le site ne permettait pas d'envisager un suivi systématique en continu des niveaux d'eau et des salinités. Enfin, pour s'adapter aux contraintes d'accessibilité et parce que les indices de reproduction du Crapaud calamite sont facilement détectables de jour, le protocole sur les Etangs et marais des salins de Camargue est mis en œuvre uniquement à travers des séances de prospections diurnes alors que pour la plupart des sites et des autres espèces, au moins une partie de la collecte des données d'amphibiens est à prévoir préférentiellement de nuit pour une meilleure détectabilité. Il ne semble donc pas pertinent d'envisager de répliquer sur d'autres sites le protocole défini sur les Etangs et marais des salins de Camargue.

En conclusion, il semble peu réaliste d'envisager la mise en place d'un protocole commun sur un réseau de sites suffisamment représentatif, dont l'objectif serait d'utiliser le Crapaud calamite comme indicateur de l'évolution des mares sur le littoral méditerranéen. En revanche, il peut être recommandé que les suivis des amphibiens là où ils sont déjà mis en place, soient complétés de suivis portant sur les niveaux d'eau, les salinités et éventuellement les hydropériodes, lorsque ces variables ne sont pas encore mesurées. La mise en place de suivis sur de nouveaux sites peut également être encouragée.

### 3. Conclusion

Le site des Etangs et marais des salins de Camargue récemment transféré au Conservatoire du littoral est en cours de renaturation depuis l'arrêt de son exploitation salicole. Les changements environnementaux induits incluent la dépoldérisation et la reconnexion des lagunes à la mer. Les mares littorales temporaires présentes dans les massifs dunaires de ces anciens salins sont nombreuses d'après notre recensement, et constituent des milieux vulnérables à la salinisation, ce que confirment nos données, avec des eaux de surface systématiquement mésohalines (5-18 PSU) à polyhalines (18-30 PSU) selon la nomenclature française (code 317, Sandre).

Bien que le Crapaud calamite soit une espèce relativement osmo-tolérante, un très faible succès de sa reproduction a été observé et ce succès tendait vers une diminution au cours des quatre années. Ce résultat est cependant à considérer avec prudence du fait des difficultés de détection des preuves de succès de reproduction ainsi que des importantes variations des cumuls de précipitation observés durant la période d'étude. Les indices de reproduction observés (avec ou sans succès) ont été moins nombreux après 2015. La reproduction échoue le plus souvent à cause de l'assèchement trop précoce des mares ou de la salinité trop élevée de l'eau, cette dernière dépassant le seuil toléré par les stades pontes et larves plus sensibles, sur une grande majorité des mares étudiées. La combinaison d'années à très faibles précipitations (2016 et 2017) et d'événements de submersion marines de grande ampleur (2016 et 2018) semble être à l'origine de cette salinisation. En particulier, nos résultats suggèrent un lien entre les valeurs des salinités et la distance des sites de reproduction aux lagunes reconnectées à la mer. Tous les sites de reproduction pour lesquels nous disposons de données altimétriques sont situés à un niveau proche du niveau marin moyen. La proximité des lagunes exposerait les sites de reproduction du Crapaud calamite à une salinisation directe par des eaux euhalines (>30 PSU), par submersion ou percolation des eaux des étangs dans les sables des systèmes dunaires entourant les mares. Nos résultats confirment donc la vulnérabilité suspectée du Crapaud calamite à la salinisation et suggèrent que l'augmentation des salinités observées dans les mares littorales temporaires au cours de notre étude, résulte au moins pour partie de la dépoldérisation du site. A terme, la salinisation de ces milieux éphémères aura certainement un impact sur la conservation de l'importante population de Crapaud calamite présente dans les anciens salins.



Figure 19. Présence de points blancs sur un lot de pontes de Crapaud calamite. Ces points blancs ont été observés sur des pontes déposées dans des eaux présentant une conductivité élevée. Il est probable que ces pontes ne soient pas viables et meurent (Photo : F. Le Borne, 2015).

Il serait souhaitable d'améliorer le protocole pour optimiser la prise de données, afin que les prochaines modélisations prennent en compte d'autres variables individuelles qui pourraient expliquer l'évolution de la salinité ou afin de mettre en avant les déplacements des sites de reproduction. D'autres mares littorales temporaires du littoral méditerranéen font potentiellement face aux mêmes risques climatiques futurs (élévation du niveau marin associée à l'augmentation des fréquences de tempêtes extrêmes).

## Remerciements

Nous tenons à remercier vivement Antoine Arnaud, Thomas Blanchon, Carole Leray, Damien Cohez, Samuel Hilaire, Florian Le Borne, Nadège Popov (Tour du Valat) ainsi que Stephan Arnassant, Sylvain Ceyte, Gaël Hemery, Katia Lombardini, Laëtitia Poulet, Fabien Revest et Patrick Rigaud (Parc naturel régional de Camargue), pour leur participation à la collecte de données sur les mares littorales et les amphibiens des Etangs et marais des salins de Camargue. Nous remercions également Tatiana Fuentes, Clément Le Gac et Florian Le Borne pour la mise à dispositions de leurs photographies.

Nous tenons aussi à remercier Patrick Grillas (Tour du Valat), qui nous a aidé dans la définition des paramètres à mesurer sur la topographie et la nappe des mares.

Nous souhaitons également à exprimer notre gratitude à Loïc Willm pour la réalisation du maillage des parcelles et leur édition cartographique, ainsi qu'à Jocelyn Champagnon pour la réalisation du tirage au sort annuel des parcelles à prospecter.

Enfin, nos remerciements chaleureux vont à toutes les personnes ayant répondu à notre enquête sur les sites des régions Occitanie et SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur.

## Références bibliographiques

- ACEMAV Coll., Duguet R. & Melki F. (2003) –*Les amphibiens de France, Belgique et Luxembourg*. Biotope, Mèze. 480 p.
- Bagella S., Gascón S., Filigheddu R., Cogoni A. & Boix D. (2016). Mediterranean Temporary Ponds: new challenges from a neglected habitat. *Hydrobiologia*, 782(1): 1–10
- Barrioz M. (2016). Occurrence des amphibiens dans les milieux saumâtres du département de la Manche (Normandie, France) et succès de la reproduction. *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 158: 1-12.
- Barrioz M. & Miaud C. (coord.) 2016. *Protocoles de suivi des populations d'amphibiens de France, POP Amphibien*. Société Herpétologique de France, 14 p  
<http://lashf.org/wp-content/uploads/2016/06/POPAMPHIBIEN.pdf>
- Bawedin V. (2004). La dépollérisation, composante d'une gestion intégrée des espaces littoraux ? Prospective sur le littoral picard et analyse à la lumière de quelques expériences. *Les Cahiers Nantais*, 2004-01(61): pp. 11–20
- Beebee T. (1985). Salt tolerances of Natterjack toad (*Bufo calamita*) eggs and larvae from coastal and inland populations in Britain. *Herpetological Journal*, 1(1): 14–16
- Beebee T. (1997). *Bufo calamita*. In: Gasc J.-P. et al.. *Atlas of amphibians and reptiles in Europe*. Societas Europaea Herpetologica, Museum National d'Histoire Naturelle. Paris: 120-121.
- Beebee T., Fleming L., and Race D. (1993). Characteristics of Natterjack toad breeding sites on a scottish salt-marsh. *Herpetological Journal*, 3(2): 68–69
- Besnard A. (2013). *D'une nécessaire interface entre biostatistiques et conservation de la nature*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Ecole Pratique des Hautes Etudes, Université de Montpellier II, 124p.
- Boix D., Biggs J., Céréghino R., Hull A. P. Kalettka, T. & Oertli B. (2012). Pond research and management in Europe: "Small is Beautiful". *Hydrobiologia*, 689 (1): 1–9
- Burhnam K.P. & Anderson D.R. (2004). *Model selection and multimodel inference. A practical information-theoretic approach*. Springer.
- Calhoun A. J., Mushet D. M., Bell K. P., Boix D., Fitzsimons J. A., & Isselin-Nondedeu F. (2017). Temporary wetlands: challenges and solutions to conserving a 'disappearing' ecosystem. *Biological Conservation*, 211: 3–11
- Cantonati M., Lapini L., Oriolo G., Calandruccio E., Garside, A. & Walton G. (2005). *Pools, ponds and marshes: small water bodies, oases of biodiversity*. Museo Friulano di Storia Naturale, Udine. OCLC: 895142138
- Cayuela H., Besnard A., Béchet A., Devictor V. & Olivier A. (2012). Reproductive dynamics of three amphibian species in Mediterranean wetlands: the role of local precipitation and hydrological regimes. *Freshwater Biology*, 57(12): 2629–2640
- Cazenave A. & Le Cozannet G. (2014). *Sea level rise and its coastal impacts*. Earth's Future, vol. 2, 2, 15-34.
- Choquet R., Rouan L. & Pradel R. (2009). Program E - SURGE: A Software Application for Fitting Multievent Models. *Environmental and Ecological Statistics* (D.L. Thomson, E.G. Cooch & M.J. Conroy, eds) Springer US: 845–865.
- Clus-Auby C., Paskoff R. & Verger, F. (2006). Le patrimoine foncier du Conservatoire du littoral et le changement climatique : scénarios d'évolution par érosion et submersion. *Annales de géographie*, (648) :115–132.
- Conservatoire d'Espaces Naturels Languedoc-Roussillon (2016). *Diagnostic écologique n°2 : Amphibiens et mares temporaires – site naturel protégé du Grand Travers – Rapport d'expertise 2016*. Rapport pour Pays de l'Or Agglomération et le Conservatoire du littoral, 45 p.
- Cramer W., Guiot J., Fader M., Garrabou J., Gattuso J.-P., Iglesias A., Lange M.A., Lionello P., Llasat M.C., Paz S., Peñuelas J., Snoussi M., Toreti A., Tsimplis M.N., Xoplaki E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change* 8: 972–980. doi: [10.1038/s41558-018-0299-2](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2)

- Geniez P. & Cheylan M. (2012). *Les amphibiens et les reptiles du Languedoc-Roussillon et régions limitrophes : atlas biogéographique*. Inventaires et biodiversité. Biotope.
- Gimenez O., Blanc L., Besnard A., Pradel R., Doherty Jr., Marboutin E. & Choquet R. (2014). Fitting occupancy models with E-SURGE: hidden Markov modelling of presence-absence data. *Methods in Ecology and Evolution*, 5 (6): 592-597.
- Giorgi F. & Lionello P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2): 90–104
- Goeldner-Gianella L., Bertrand F., Pratlong F. & Gaultier-Gaillard S. (2013). Submersion marine et dépoldérisation : le poids des représentations sociales et des pratiques locales dans la gestion du risque littoral. *Espace Populations Sociétés*, (1-2): p. 193–209
- Gomez-Mestre I. & Tejedo, M. (2003). Local adaptation of an anuran amphibian to osmotically stressful environments. *Evolution*, 57(8): 1889
- Gomez-Mestre I. & Tejedo M. (2004). Contrasting patterns of quantitative and neutral genetic variation in locally adapted populations of the Natterjack toad, *Bufo calamita*. *Evolution*, 58(10): 2343
- Graitson E., Denoël M., Jacob J.-P., Percsy C., de Wavrin H., Kinet T., Paquay M., Percsy N. & Remacle A. (2007). *Amphibiens et Reptiles de Wallonie*. Aves - Raîgne et Centre de Recherche de la Nature, des Forêts et du Bois. Série « Faune - Flore - Habitats » n° 2 :384. 142–151
- Grillas P., Gauthier P., Yavercovski N. & Perennou C. (2004). *Les mares temporaires méditerranéennes : enjeux de conservation, fonctionnement et gestion, volume 1*. Station biologique de la Tour du Valat, Arles. 119 p.
- Guillaume C.P. (1975). *Reptiles et batraciens de grande Camargue. Approche comparative avec la faune des Marismas (sud-ouest de l'Espagne)*. Thèse, Université de Montpellier. 97p.
- Hopkins G. R., Brodie E. D., Neuman-Lee L. A., Mohammadi S., Bruschi G. A., Hopkins Z. M. & French S. S. (2016). Physiological responses to salinity vary with proximity to the ocean in a coastal amphibian. *Physiological and Biochemical Zoology*, 89(4): 322–330
- Hopkins G. R. & Brodie Jr E. D. (2015). Occurrence of amphibians in saline habitats: a review and evolutionary perspective. *Herpetological Monographs*, 29(1): 1–27
- Jakob C. (2004). *Bufo calamita*. In: Grillas P., Gauthier P., Yavercovski N. & Perennou C. (2004). *Les mares temporaires méditerranéennes : fiche espèces, volume 2*. Station biologique de la Tour du Valat : 102-104.
- Le Garff B. & Geniez P. (2012). *Bufo calamita*. In: Lescure J. & de Massary J.-C. (coord). *Atlas des amphibiens et reptiles de France*. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris: 108-109.
- MacKenzie D. I., Nichols J. D., Lachman G. B., Droege S., Royle J. A. & Langtimm C. A. (2002). Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology*, 83(8): 2248–2255.
- MacKenzie D. I., Nichols J. D., Lachman G. B., Knutson M.G. & Franklin A. B (2003). Estimating site occupancy, colonization, and local extinction when a species is detected imperfectly. *Ecology*, 84 (8): 2200-2207.
- MacKenzie D. I., Nichols J. D., Royle J. A., Pollock K. H., Bailey L., & Hines J. E. (2017). *Occupancy estimation and modeling: inferring patterns and dynamics of species occurrence*. 2nd edition, Elsevier. 648p.
- Marchand M. A., Roy C., Renet J., Delauge J., Meyer D. & Hayot C. (2017). *Listes rouge régionale des amphibiens et reptiles de Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Rapport technique, Conservatoire d'espaces naturels Provence-Alpes-Côte d'Azur. CEN PACA, DREAL PACA, IUCN France, 16p.
- Mathias J. H. (1971). The comparative ecologies of two species of amphibia (*Bufo bufo* and *Bufo calamita*) on the Ainsdale Sand Dunes National Nature Reserve. Ph.D., University of Manchester.
- Miaud C. & Sanuy D. (2005). Terrestrial habitat preferences of the Natterjack toad during and after the breeding season in a landscape of intensive agricultural activity. *Amphibia-Reptilia*, 26(3): 359–366
- Olivier A. & Cheylan M. (2019). *Les amphibiens*. In : Blondel J., Barruol G., & Vianet R. *Encyclopédie de la Camargue*. Nouvelle édition. Buchet-Chastel. 86-87.
- Olivier A., Thibault M. & Béchet A. (2019). *Le Crapaud calamite*. In : Blondel J., Barruol G., & Vianet R. *Encyclopédie de la Camargue*. Nouvelle édition. Buchet-Chastel. 105-106.

- Pradel R. (2005). Multievent: an extension of multistate capture–recapture models to uncertain states. *Biometrics*, 61(2): 442–447
- Reading C. J. (2007). Linking global warming to amphibian declines through its effects on female body condition and survivorship. *Oecologia*, 151(1): 125–131
- Stuart S. N., Chanson J. S., Cox N. A., Young B. E., Rodrigues A. S., Fischman D. L. & Waller R. W. (2004). Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 306(5702): 1783–1786
- Thirion J.-M. (2014). Salinity of the reproduction habitats of the Western Spadefoot Toad *Pelobates cultripes* (CUVIER, 1829), along the Atlantic coast of France (Anura: Pelobatidae). *Herpetozoa*, 27(1-2): 13–20.
- Tour du Valat (2012). *Etat écologique initial des étangs et marais des salins de Camargue*. Rapport pour le Parc de Camargue et le Conservatoire du littoral, 211p.
- Tour du Valat (2016). *Site des Etangs et marais des salins de Camargue – Bilan des activités réalisées par la Tour du Valat – année 2016*. Rapport Tour du Valat, en partenariat avec le Conservatoire du littoral, le Parc de Camargue et la SNPN, 70p.
- Weir L. A., Royle J. A., Nanjappa P. & Jung R. E. (2005). Modeling Anuran detection and site occupancy on North American Amphibian Monitoring Program (NAAMP), routes in Maryland. *Journal of Herpetology*, 39(4): 627–639
- Zuur A. F. & Ieno E. N. (2016). A protocol for conducting and presenting results of regression- type analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(6) : 636–645

## Annexes

### Annexe 1. Équipes d'observateurs ayant participé au projet de 2015 à 2018

<b>Observateurs 2015</b>		<b>Observateurs 2016</b>	
Noms, Prénoms	Nombre de parcelles	Noms, Prénoms	Nombre de parcelles
Arnassant S.	3	Arnassant S.	4
Arnaud A.	4	Arnaud A.	4
Blanchon T.	2	Blanchon T.	5
Cohez D.	3	Cohez D.	2
Hemery G.	4	Hilaire S.	4
Hilaire S.	4	Olivier A.	6
Lombardini K.	4	Poulet L.	3
Olivier A.	3	Revest F.	6
Poulet L.	6	Rigaud P.	7
Revest F.	5	Tetrel C.	4
Rigaud P.	4	Thibault M.	5
Tetrel C.	4		
Thibault M.	4		

<b>Observateurs 2017</b>		<b>Observateurs 2018</b>	
Noms, Prénoms	Nombre de parcelles	Noms, Prénoms	Nombre de parcelles
Arnassant S.	6	Arnassant S. / Poulet L.	5
Arnaud A.	4	Arnaud A.	6
Blanchon T.	2	Blanchon T.	2
Cohez D.	3	Ceyte S. / Rigaud P.	5
Hilaire S.	3	Fayard A.	5
Le Borne F.	5	Hilaire S.	6
Leray C.	3	Olivier A.	8
Olivier A.	8	Tetrel C.	5
Popov N.	2	Thibault M.	5
Poulet L.	6		
Rigaud P.	3		
Thibault M.	5		

## Annexe 2. Protocole d'échantillonnage de la méthode en site occupancy fourni aux observateurs

### Plan d'échantillonnage

- sur 50 placettes d'1 hectare, 22 ont été pré-sélectionnées (présence de sites de reproduction avérés), 28 ont été tirés au sort parmi un ensemble de placettes présentant potentiellement des sites de reproduction actuellement ou à l'avenir
- les répliques temporels doivent être au minimum de trois passages au cours d'une saison sur une même unité d'échantillonnage
- au sein d'un espace chaque unité d'échantillonnage doit être sélectionnée aléatoirement

### Prospection

- La prospection est réalisée durant la journée. La durée de prospection est aléatoire.
- Le cheminement au sein de la placette doit être aléatoire et doit permettre de couvrir l'ensemble des sites potentiels de reproduction de crapaud calamite présents sur la placette
- La période prospection doit être comprise entre le 15 mars et le 8 juin, avec :
- 1er passage entre le 15 mars et le 8 avril
  - 2e passage entre le 15 avril et le 8 mai
  - 3e passage entre le 15 mai et le 8 juin

**Merci de bien noter les coordonnées des sites de reproduction de calamite que vous trouverez hors carrés. Les indiquer dans la fiche de saisie calamite en indiquant HC**

### Matériel

- fiches de saisies + vue aérienne des parcelles + crayon
- cuissardes ou bottes
- GPS
- matériel pour mesurer la hauteur d'eau (ex canne de Provence avec une marque tous les 5 ou 10cm).
- appareil photo
- conductimètre ou petits bidons de prélèvement

## Instructions pour le remplissage des fiches observations

### informations générales :

- n° passage : indiquer si c'est le 1er, le 2e ou le 3e passage de la saison
- couverture nuageuse : 0-33% = 1 ; 33-66% = 2 ; 66-100% = 3
- pluie : absente = 1 ; bruine = 2 ; averses = 3
- vent : absent = 1 ; faible = 2 ; moyen à fort = 3

### descriptif pour chaque mare (avec ou sans calamite) :

- coordonnées GPS
  - conductivités (en mS)
  - profondeur maximale (indiquer quand la mare est à sec)
  - turbidité
1. Eau très claire ou claire, jusqu'au fond de la mare. Pas de problème de visibilité
  2. Eau faiblement turbide ou colorée. Gêne modérée pour la visibilité
  3. Eau fortement turbide ou colorée. Une partie de la colonne d'eau et le fond de la mare ne sont pas visibles.
- végétation aquatique : indiquer la présence / absence de végétation. Il n'est pas indispensable d'identifier jusqu'à l'espèce, mais à minima indiquer présence / absence de phanérogames et/ou characées et/ou algues filamenteuses. **Merci de ramener des échantillons de plantes (dans des piluliers) à Jean Baptiste Mouronval qui les déterminera**

### Observations calamites

- pontes : les dénombrer à l'unité, puis classes 10-20, 21-50, 51-100, >100, >200, >500, >1000
- tetards : les dénombrer à l'unité, puis classes 10-20, 21-50, 51-100, >100, >200, >500, >1000
- imagos : les dénombrer à l'unité, puis classes 10-20, 21-50, 51-100, >100, >200, >500, >1000. Merci de **rechercher spécifiquement les imagos dans la végétation rivulaire des mares**
- adultes reproducteurs : les dénombrer à l'unité
- chanteurs (animaux seulement entendus) : les dénombrer à l'unité
- cadavre (très souvent des cadavres flottants dans l'eau au moment de la reproduction) : les dénombrer à l'unité

Annexe 3. Fiche de terrain pour le suivi de la reproduction d'*Epidaela calamita* à remplir par les observateurs *en site occupancy*

<b>id_quadrat :</b>	<b>date :</b>	<b>n° passage :</b>	<b>id_photo(s) :</b>				
<b>observateur :</b>	<b>heure début :</b>	<b>heure fin :</b>					
<b>nuages :</b>	<b>pluie :</b>	<b>vent :</b>					

<b>mares avec calamites</b>	<b>n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
coord. (WGS84) NORD							
coord. (WGS84) EST							
<b>Conductivité (mS)</b>							
<b>Profondeur (au plus profond)</b>							
<b>Turbidité</b>							
<b>Surface approximative en eau</b>							
Végétation aquatique (O/N) :							
- <i>Ruppia cirrhosa / maritima</i> (O/N)							
- <i>Athenia filiformis</i> (O/N)							
- <i>Chara sp</i> (O/N)							
Algues filamenteuses (O/N)							
Autre / Indéterminé (O/N)							
<b>Observations calamites</b>							
<b>nombre pontes</b>							
<b>nombre têtards</b>							
<b>nombre imagos</b>							
<b>nbre adultes reproducteurs</b>							
<b>nbre chanteurs entendus</b>							
<b>nombre cadavres</b>							
<b>Autres amphibiens</b>							

<b>mares sans calamites</b>	<b>n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
coord. (WGS84) NORD							
coord. (WGS84) EST							
<b>Conductivité (mS)</b>							
<b>Profondeur (au plus profond)</b>							
<b>Turbidité</b>							
<b>Surface approximative en eau</b>							
Végétation aquatique (O/N) :							
- <i>Ruppia cirrhosa / maritima</i> (O/N)							
- <i>Athenia filiformis</i> (O/N)							
- <i>Chara sp</i> (O/N)							
Algues filamenteuses (O/N)							
Algues filamenteuses (O/N)							

Annexe 4. Localisations des 24 sites de reproductions d'*Epidalea calamita* répertoriés avant le démarrage de l'étude (in : Rapport écologique initial des marais et salins de Camargue, Tour du Valat 2012)

### SITE DE REPRODUCTION

- Crapaud calamite 2009-2011
- Rainette méridionale
- Crapaud calamite 2014



## Annexe 5. Matrices de transitions du modèle multi-saisons sous E-SURGE

états initiaux E SURGE	
pas occupé	occupé
*	p

g	groupe
t	pas de temps

### transition occupation Formules

	pas occupé	occupé	mort
pas occupé	*	y	-
occupé	y	*	-
mort	-	-	*

$$to.t(1\ 2\ 4\ 5\ 7\ 8\ 10\ 11)+to.t(3,6,9)$$

$$g(1).[to.t(1\ 2\ 4\ 5\ 7\ 8\ 10\ 11)+to.t(3,6,9)]+others$$

Modèles dynamiques Parcelles pré-sélectionnées (1&2)  
Modèle regroupement deux méthodes d'échantillonnage (3)

### événement versus états Formules

	absence	présence
pas occupé	*	-
occupé	*	b
mort	*	-

$$t(1)\&t(4)\&t(7)\&t(10)+t(2)\&t(5)\&t(8)\&t(11)+t(3)\&t(6)\&t(9)\&t(12)$$

$$t(1:3).g(1:2)+t(4:6).g(1:3)+t(7:9).g(1:4)+t(10:12).g(1:5)+others$$

Modèles dynamiques (1&2)  
Modèle regroupement (3)