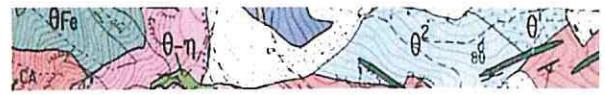


Document public



Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises

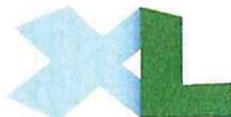
Rapport final

BRGM/RP-64633-FR

Avril 2015



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



Département
des Landes



Geosciences pour une Terre durable
brgm

Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises

Rapport final

BRGM/RP-64633-FR
Avril 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP13AQI25

P. Corbier

Avec la collaboration de
C.A. Bonneau

Vérificateur :

Nom : Olivier DOUEZ

Date : 05/05/15

Approbateur :

Nom : Nicolas PEDRON

Directeur du BRGM Aquitaine par
intérim

Date : 27/07/2015



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : ACP, géologie, hydrogéologie, inventaire, lagunes, Landes, morphologie, MNT, Plio-Quaternaire

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Corbier P. avec la collaboration de C.A. Bonneau (2015) - Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises. Rapport final. BRGM/RP-64633-FR, 98 p., 96 ill., 2 ann.

Synthèse

Face à une évolution défavorable du nombre de lagunes répertoriées sur son territoire, le Département des Landes s'est engagé dans une politique de préservation de ces milieux.

Dans le cadre de son premier programme d'études (2011-2013), il a sollicité le BRGM pour mener une étude visant à compléter la caractérisation des lagunes déjà entreprise et éventuellement identifier les facteurs de disparition de certaines d'entre elles.

Les investigations ont porté sur l'origine des lagunes, le contexte morphologique, pédologique, géologique et hydrogéologique. De façon résumée, on retiendra que :

- l'origine éolienne constitue l'origine la plus probable,
- la plupart des lagunes sont positionnées dans la zone médiane ou amont des bassins versants sur lesquels elles se trouvent, dans des environnements plats (pente < 1 %) et d'altitudes plutôt élevées pour le département des Landes (> 60 m NGF),
- partout, des sables éoliens recouvrent les formations détritiques en place,
- la plupart des lagunes se situent dans un environnement où l'épaisseur des formations plio-quaternaires est comprise entre 0 et 40 m,
- qu'il existe une très bonne correspondance des paramètres physico-chimiques mesurés au droit de la nappe plio-quaternaire et des lagunes laissant supposer une bonne connexion entre les eaux souterraines et superficielles,
- les lagunes se caractérisent par de fortes teneurs en matière organique et en fer et que leur vulnérabilité est importante (contamination par des nitrates et des pesticides avérée observée sur la seule lagune implantée à proximité d'une parcelle agricole et ayant fait l'objet d'un prélèvement d'eau),
- la faible profondeur des niveaux piézométriques à l'aplomb des lagunes observée en août 2014 conforte l'hypothèse d'une participation très probable de la nappe superficielle à l'alimentation de ces milieux.

Ces caractéristiques n'ont pas été jugées suffisantes pour proposer un schéma conceptuel de fonctionnement pour l'ensemble des lagunes landaises mais l'équipement de la lagune de Paulin à Cere, réalisé dans le cadre de ce programme, devrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de cette lagune pilote à court terme.

En ce qui concerne les facteurs de disparition, il est apparu que les facteurs climatiques et anthropiques constituaient les 2 pistes les plus probables, du moins pour l'intervalle 1994 à 2005-2008.

Les conditions climatiques ont en effet évolué de façon négative pour ce type de milieux ces dernières années avec une augmentation des températures (+1°C lors des 25 dernières années) et une diminution des pluies (- 17 % de pluie sur la période 2000-2012 par rapport à la période 1990-2000).

La réapparition de zones humides au droit de lagunes considérées comme asséchées suite aux fortes pluies de 2013 (ex : Cere) témoigne en tout cas de cet impact.

Les travaux d'aménagement et de drainage réalisés dans le cadre des activités agricoles et sylvicoles du massif landais constituent une autre piste même si ces opérations sont réalisées dans le respect de l'environnement et des bonnes pratiques.

Pour compléter les investigations menées dans le cadre de ce présent travail, il pourrait être intéressant de retracer l'évolution d'une dizaine de lagunes considérées comme disparues.

Les investigations pourraient consister en la mise en œuvre de techniques novatrices (télédétection, drone, ULM, lever LIDAR...) pour mieux appréhender la géométrie des systèmes lagunes/fossés et se poursuivre par une enquête auprès des propriétaires pour identifier les actions mises en œuvre lors des 20 à 30 dernières années.

Cela permettrait en particulier d'apprécier plus finement la part de responsabilité de chaque facteur (météorologique ou anthropique) dans le phénomène de disparition des lagunes.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	11
1.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES LAGUNES	13
1.3. ORIGINE DES LAGUNES	16
1.3.1. L'origine karstique ou cryptokarstique	16
1.3.2. L'origine périglaciaire ou thermokarstique	17
1.3.3. L'origine éolienne.....	20
1.3.4. Bilan	22
1.4. METHODOLOGIE D'ETUDE RETENUE.....	22
1.4.1. Généralités	22
1.4.2. Tests statistiques	22
2. Analyse des facteurs climatiques	23
2.1. LES TEMPERATURES.....	23
2.2. LES PRECIPITATIONS	26
2.3. BILAN	29
3. Synthèse des données hydrologiques	31
4. Synthèse des données hydrogéologiques	35
5. Contexte physique et localisation des lagunes par rapport aux bassins versants	41
5.1. CONTEXTE PHYSIQUE	41
5.1.1. Altitudes.....	41
5.1.2. Pentes	41
5.2. LOCALISATION PAR RAPPORT AUX BASSINS VERSANTS	44
5.2.1. Répartition générale.....	44
5.2.2. Distance à la crête la plus proche	46
5.2.3. Distance à l'exutoire.....	48
5.3. BILAN	48
6. Contexte géologique	51
6.1. AGENCEMENT DES FORMATIONS AU DROIT DU DEPARTEMENT DES LANDES .	53
6.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE	57

6.2.1. Nature des formations mio-plio-quaternaires affleurantes	57
6.2.2. Epaisseur des formations mio-plio-quaternaires	58
6.2.3. Nature du substratum sous-jacent	60
6.3. BILAN	62
7. Autres facteurs.....	63
7.1. OCCUPATION DU SOL	63
7.2. PROXIMITE DES FOSSES	66
7.2.1. Données bibliographiques	66
7.2.2. Analyse des données disponibles.....	67
7.3. BILAN	67
8. Identification des facteurs de disparition.....	71
9. Echantillonnage de 5 lagunes	73
9.1. ANALYSES D'EAU	80
9.1.1. Paramètres physico-chimiques.....	80
9.1.2. Comparaison avec les résultats obtenus sur les territoires des SAGE Born-et-Buch, Leyre et Midouze	80
9.1.3. Analyses complètes.....	83
9.2. ANALYSES DE SOLS	85
9.2.1. Observations de terrain	85
9.2.2. Analyses réalisées en laboratoire	89
9.3. BILAN	90
10. Instrumentation d'un site pilote	91
11. Conclusion	95
12. Bibliographie	97

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des 434 lagunes inventoriées entre 2005 et 2008.....	11
Illustration 2 : Sites visités le 5 avril 2013.....	13
Illustration 3 : Photographies prises le 5 avril 2013.....	14
Illustration 4 : Espèces végétales couramment observées au droit des lagunes	15
Illustration 5 : Schéma illustrant l'origine karstique ou cryptokarstique possible des lagunes landaises (d'après Galloway et al., 1999).....	16
Illustration 6 : Exemples de pingos canadiens	17
Illustration 7 : Schéma illustrant l'origine périglaciaire ou thermokarstique possible des lagunes landaises (d'après Legigan, 1979).....	18
Illustration 8 : Coin de glace et sols polygonaux	19
Illustration 9 : Extension du pergélisol en France au Dernier Maximum Glaciaire (20000 BP) d'après Van-Vliet-Lanoë, 2000	19
Illustration 10 : Localisation des dunes et des lagunes dans les Landes	20
Illustration 11 :Lagunes en aval des dunes	21
Illustration 12 : Lagunes en amont des dunes	21
Illustration 13 : Augmentation des températures annuelles sur la période de 1901-2000 (source ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique)	23
Illustration 14 : Evolution des températures moyennes sur la période 1900-2006 (d'après « Prévoir pour agir », 2013).....	24
Illustration 15 : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1958-2012.....	25
Illustration 16 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux températures moyennes annuelles relatives au poste de Mont-de-Marsan	25
Illustration 17 : Tendance des précipitations saisonnières 1901-2000 d'après Météo France	26
Illustration 18 : Cumuls annuels de précipitations sur la période 1958-2012.....	27
Illustration 19 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux cumuls annuels de précipitations sur le poste de Mont-de-Marsan (période 1958-2012)	28
Illustration 20 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux cumuls annuels de précipitations sur le poste de Mont-de-Marsan (période 1990-2012)	28
Illustration 21 : Périodes de suivi des stations hydrométriques des Landes.....	32
Illustration 22 : Localisation des stations hydrométriques et débits mensuels moyens associés	32
Illustration 23 : Evolution des débits annuels moyens et médians de l'Adour à Saint-Vincent-de-Paul (40).....	33
Illustration 24 : Mise en parallèle des cumuls annuels de précipitations à Mont-de-Marsan et des débits moyens annuels à Saint-Vincent-de-Paul.....	33
Illustration 25 : Tests de Pettitt et Man-Kendall sur les débits médians annuels	34
Illustration 26 : Informations relatives au stockage des eaux superficielles sur le bassin Adour-Garonne d'après www.eau-adour-garonne.fr	34
Illustration 27 : Réseau de surveillance piézométrique du Département des Landes d'après SIGES Aquitaine	35
Illustration 28 : Ouvrages implantés dans la formation du Sable des Landes d'après Département des Landes	36

Illustration 29 : Tests statistiques (Pettitt, Man-Kendall et Le Sen) appliqués aux cotes piézométriques des 5 ouvrages de référence.....	38
Illustration 30 : Synthèse des variations mises en évidence par les tests statistiques sur les 20 à 25 dernières années	39
Illustration 31 : Localisation des lagunes et MNT	42
Illustration 32 : Altitude du centroïde des lagunes et répartition en fonction de leur état.....	42
Illustration 33 : Détails de la répartition des centroïdes des lagunes	43
Illustration 34 : Pentes moyennes dans un rayon de 50 m autour des lagunes.....	43
Illustration 35 : Pentes moyennes dans un rayon de 50 m et répartition en fonction des lagunes	44
Illustration 36 : Détails de la répartition des pentes moyennes dans un rayon de 50 m.....	44
Illustration 37 : Localisation des lagunes par rapport aux bassins versants	45
Illustration 38 : Nombre de lagunes par bassin versant et répartition en fonction de leur état	45
Illustration 39 : Détails de la répartiton des lagunes par rapport aux bassins versants	46
Illustration 40 : Distances à la crête la plus proche	47
Illustration 41 : Distance à la crête la plus proche et répartition en fonction de l'état des lagunes.....	47
Illustration 42 : Détails sur les distances à la crête la plus proche	48
Illustration 43 : Rapport entre distance à l'exutoire et distance maximum	49
Illustration 44 : Rapport entre distance à l'exutoire et distance maximum et répartition en fonction de l'état des lagunes	49
Illustration 45 : Détails sur les rapports entre distance à l'exutoire et distance maximum	50
Illustration 46 : Exploitation des formations plio-quaternaires à Belin-Beliet (Formation de Belin) d'après SIGES Aquitaine	51
Illustration 47 : Log théorique des formations mio-plio-quaternaires (d'après Corbier et al, 2010)	52
Illustration 48 : Tracé des coupes réalisées pour préciser l'agencement des formations mio-plio-quaternaires	53
Illustration 49 : Coupes 11 à 14	54
Illustration 50 : Coupes 1 à 4 (légende similaire à illustration 49)	55
Illustration 51 : Zonation sur la base de critères géologiques	56
Illustration 52 : Epaisseurs moyennes des formations mio-plio-quaternaires sur les 4 zones définies	57
Illustration 53 : Formations mio-plio-quaternaires affleurantes	57
Illustration 54 : Formations mio-plio-quaternaires affleurantes et répartition en fonction de l'état des lagunes.....	58
Illustration 55 : Détails sur les formations mio-plio-quaternaires affleurantes	58
Illustration 56 : Epaisseur des formations plio-quaternaires (limite inférieure = base de la formation d'Arengosse) au droit de chaque lagune	59
Illustration 57 : Epaisseur des formations plio-quaternaires et répartition en fonction de l'état des lagunes.....	59
Illustration 58 : Détails sur l'épaisseur des formations plio-quaternaires	60
Illustration 59 : Nature du substratum	61
Illustration 60 : Nature du substratum et répartition en fonction de l'état des lagunes	61
Illustration 61 : Détails sur la nature du substratum	62

Illustration 62 : Répartition des surfaces au droit du département des Landes (d'après SIRS, 2013)	63
Illustration 63 : Occupation des sols.....	64
Illustration 64 : Occupation des sols et répartition en fonction de l'état des lagunes	64
Illustration 65 : Détails sur l'occupation des sols.....	65
Illustration 66 : Schéma représentant le drainage assuré par les fossés (modifié, d'après ONF, 2013)....	66
Illustration 67 : Distance au fossé le plus proche	68
Illustration 68 : Distance au fossé le plus proche et répartition en fonction de l'état des lagunes	68
Illustration 69 : Détails sur la distance au fossé le plus proche.....	69
Illustration 70 : Diagramme des variables	72
Illustration 71 : Diagramme des individus.....	72
Illustration 72 : Localisation des 5 sites échantillonnés.....	73
Illustration 73 : Caractéristiques des 5 sites retenus.....	74
Illustration 74 : Illustrations relatives à la lagune SAUG07	75
Illustration 75 : Illustrations relatives à la lagune GELO03.....	76
Illustration 76 : Illustrations relatives à la lagune CERE01.....	77
Illustration 77 : Illustrations relatives à la lagune ARUE08.....	78
Illustration 78 : Illustrations relatives à la lagune ESCA02.....	79
Illustration 79 : Récapitulatif des paramètres physico-chimiques mesurés sur les 5 sites	80
Illustration 80 : Températures observées au droit des différents SAGE et des lagunes	81
Illustration 81 : Conductivités observées au droit des différents SAGE et des lagunes	82
Illustration 82 : pH observés au droit des différents SAGE et des lagunes	82
Illustration 83 : Résultats des analyses complètes réalisées sur les 5 lagunes (seuls les micro-polluants quantifiés des rubriques 8 et 9 ont été mentionnés)	83
Illustration 84 : Photos de garluche (à l'état naturel à gauche et prise dans du ciment à droite)	84
Illustration 85 : Horizons superficiels au droit des 5 sites	85
Illustration 86 : Carte de répartition des sables éoliens, limons et loess aquitains (d'après Sitzia, 2014).....	87
Illustration 87 : Carte des dépôts éoliens du Bassin Aquitain (d'après Sitzia, 2014)	87
Illustration 88 : Coupes géologiques réalisées au droit des lagunes	88
Illustration 89 : Résultats des analyses de sol	89
Illustration 90 : Localisation de la lagune de Paulin à Cere d'après Géoportail.....	91
Illustration 91 : Localisation des piézomètres sur fond cadastral d'après Géoportail	92
Illustration 92 : Réalisation des 3 piézomètres du 1 au 3 décembre 2014	92
Illustration 93 : Caractéristiques des ouvrages	93
Illustration 94 : Succession des terrains rencontrés dans les 3 piézomètres	93
Illustration 95 : Localisation des points nivélés et repères retenus	94
Illustration 96 : Coordonnées des ouvrages	94

Liste des annexes

Annexe 1 : Détail des méthodes statistiques utilisées	99
Annexe 2 : Homogénéisation des données climatiques.....	107

1. Introduction

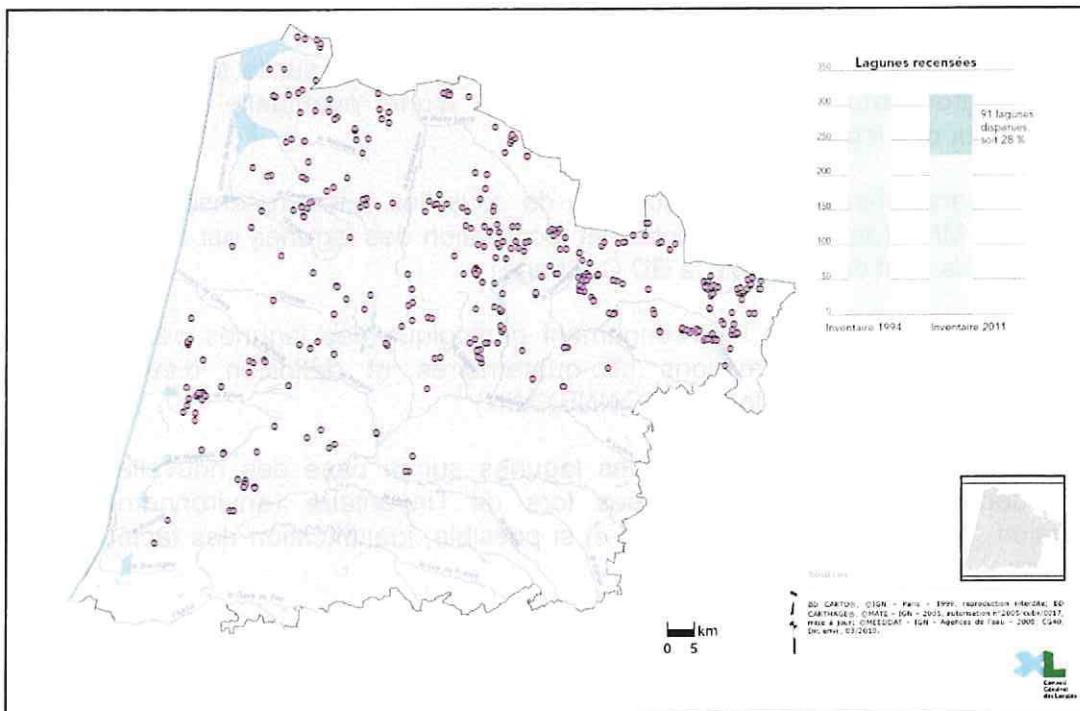
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les lagunes landaises correspondent à de petites étendues d'eau douce généralement circulaires et de taille inférieure à 1 hectare qui parsèment le plateau landais.

Elles constituent, au cœur de la forêt, des zones témoins du niveau de la nappe et donc de la ressource en eau, facteur indispensable à la pérennité du massif forestier.

Elles correspondent aussi à des milieux oligotrophes (pauvres en éléments nutritifs) mais riches en espèces animales et végétales spécifiques et à caractère patrimonial pour le département des Landes. **Leur préservation est donc un enjeu majeur.**

Un premier inventaire mené en 1994 avait montré que plus de la moitié des lagunes (53 %) avait disparu entre 1983 et 1994 (GEREA, 1994). Un second inventaire mené entre 2005 et 2008 par le Département des Landes a permis de recenser 434 lagunes réparties sur 79 communes parmi lesquelles 86 % présentent une taille inférieure à 1 hectare (0,3 ha en moyenne), 50 % ont été jugées évoluées (c'est-à-dire en train de se fermer du fait d'un développement spontané d'une végétation arborescente), 62 % ont fait l'objet d'interventions humaines (creusements, aménagement de fossés de drainage, essais de plantation...) et **91 qui avaient été recensées en 1994 n'existent plus** (diminution de 28 %) (Illustration 1).



Face à cette évolution défavorable des lagunes, le Département a souhaité s'engager dans une politique de préservation de ces milieux. C'est dans cet objectif qu'il a répondu à un appel à projets de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Suite à la sélection de son projet, le Département des Landes a lancé un premier programme d'études (2011-2013) destiné à développer la prise en compte des enjeux liés aux lagunes en initiant et en accompagnant les projets de préservation de ces dernières et comportant 4 axes :

- **AXE 1** : Informer et sensibiliser les différents acteurs du territoire à la préservation des lagunes par la mise en œuvre d'un plan de communication spécifique
- **AXE 2** : Identifier des sites à enjeux pour engager des partenariats particuliers avec les acteurs publics et privés en engageant une animation du programme sur le territoire
- **AXE 3** : Assurer une gestion pérenne des lagunes en définissant des méthodologies de gestion adaptées sur des lagunes identifiées
- **AXE 4** : Animer, coordonner et évaluer les actions engagées

La présente étude qui vise à compléter la caractérisation des lagunes déjà entreprise et éventuellement à identifier les facteurs de disparition de certaines d'entre elles s'inscrit dans le cadre de l'axe 3 du programme et comportera 8 volets :

- ☛ **Volet 1** : Analyse des données climatiques sur les 30 à 60 dernières années pour mettre en évidence une éventuelle influence du climat sur la disparition des lagunes.
- ☛ **Volet 2** : Synthèse des données relatives à l'hydrologie de surface et aux pratiques mises en œuvre pour l'entretien des réseaux de drainage
- ☛ **Volet 3** : Synthèse des données piézométriques disponibles sur le secteur d'étude et des paramètres hydrodynamiques disponibles en vue d'une éventuelle définition de zones d'influence autour des lagunes
- ☛ **Volet 4** : Caractérisation morphologique de tous les sites recensés sur la base de l'exploitation du MNT (définition de pentes) et localisation des lagunes par rapport aux bassins versants tels qu'ils sont définis dans la BD Carthage
- ☛ **Volet 5** : Caractérisation de l'environnement géologique des lagunes par l'exploitation du modèle 10 couches des formations plio-quaternaires et définition d'éventuelles zones d'influence autour des lagunes (logiciel CONNEXMIN)
- ☛ **Volet 6** : Définition d'une typologie des lagunes sur la base des nouvelles informations obtenues, des caractéristiques identifiées lors de l'inventaire (environnement immédiat, artificialisation...) et de l'occupation du sol et si possible, identification des facteurs de risques de disparition
- ☛ **Volet 7** : Prélèvements de sols et caractérisation hydrogéochimique de 5 lagunes et comparaison avec les résultats obtenus sur les territoires des SAGE Born-et-Buch et Leyre
- ☛ **Volet 8** : Instrumentation d'un site pilote : création de 3 piézomètres de 10 m de profondeur en vue d'un suivi précis des niveaux piézométriques et nivellation. Au terme de la première année de suivi, il pourra être décidé d'équiper les piézomètres de capteurs permettant un enregistrement automatique des niveaux et ainsi, de pérenniser le suivi

Il est à noter qu'en 2014, un deuxième programme (pour la période 2014-2018) a été retenu par l'Agence de l'Eau. Il permettra de poursuivre les actions de préservation et de restauration des lagunes (Axe 1) et de continuer à informer et sensibiliser différents publics (Axe 2).

1.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES LAGUNES

Le département des Landes se caractérise par une superficie de 9 243 km², 331 communes et une population d'environ 390 000 habitants.

Avant la tempête Klaus de janvier 2009, la forêt des Landes (qui est la plus grande de France) couvrait environ 67 % du département. Cette couverture composée essentiellement de pins maritimes est plus importante au nord qu'au sud de l'Adour où l'on rencontre un pays plus vallonné (la Chalosse) et de nombreuses parcelles dédiées aux cultures (maïs, vigne,...) et à l'élevage (bœufs, canards,...).

L'illustration 1 montre que la plupart des lagunes se situe au nord de la Midouze. A noter que cet espace de répartition s'inscrit dans un ensemble plus vaste qui s'étend au-delà des frontières départementales, dans le sud Gironde et en Lot-et-Garonne.

Le 5 avril 2013, 5 sites ont pu être visités avec une représentante du service ENS du Département des Landes. L'illustration suivante permet de repérer les communes concernées (Geloux, Cere, Brocas, Vert et Luxey).

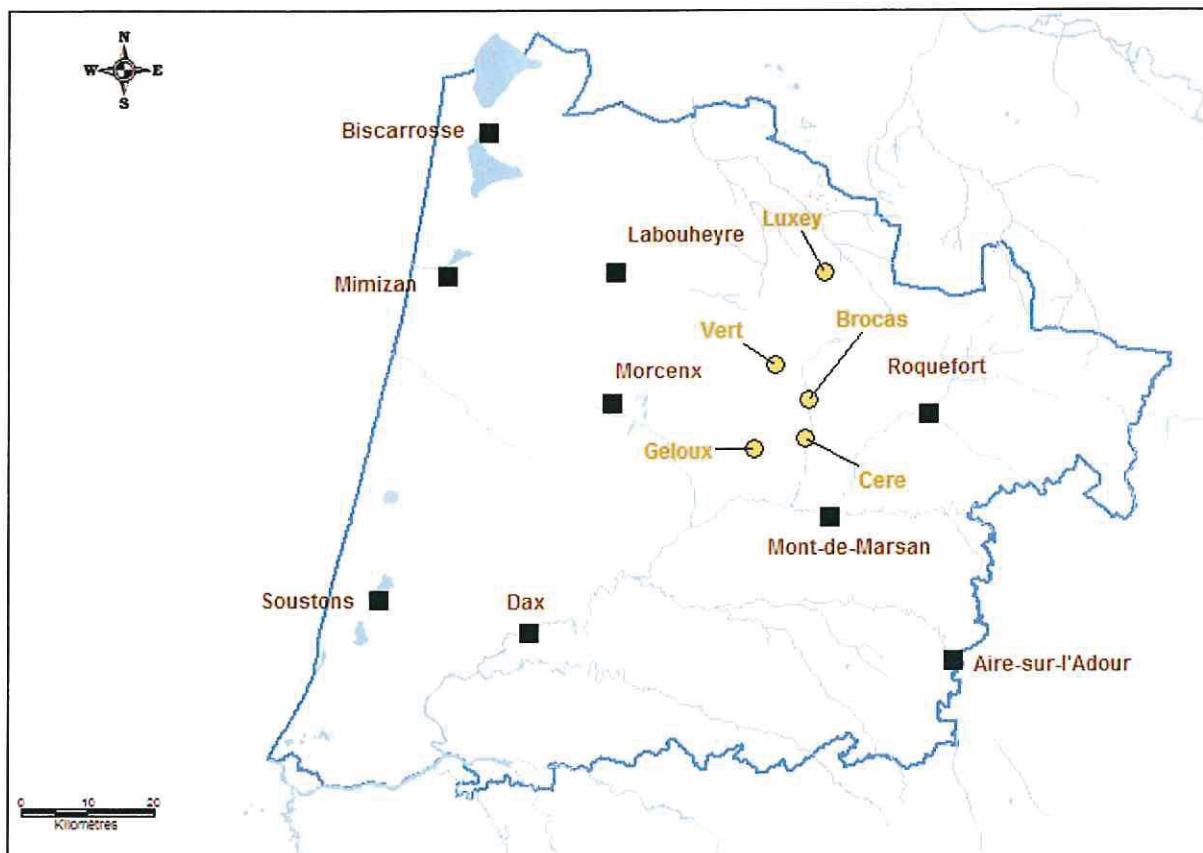
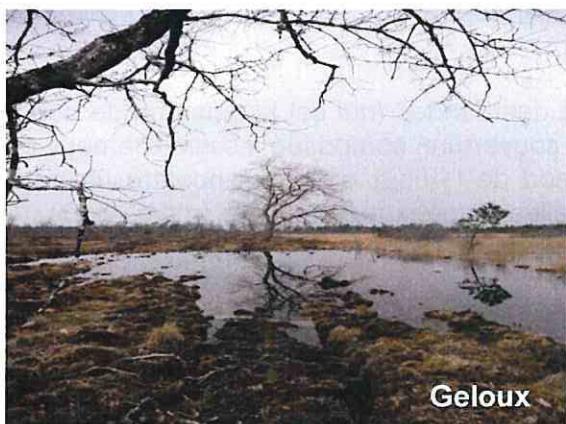
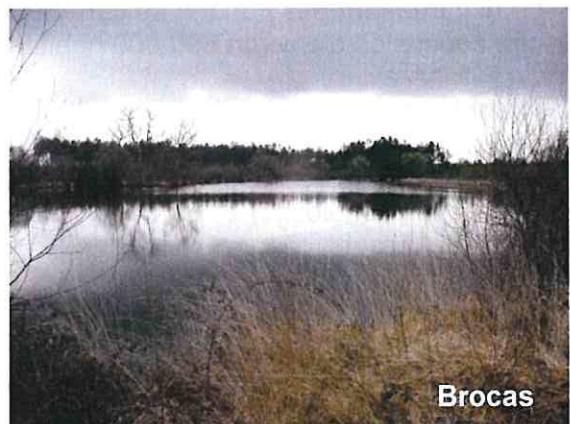


Illustration 2 : Sites visités le 5 avril 2013

L'illustration suivante correspond à une planche de photos prises le 5 avril 2013. Les 3 premières correspondent à des lagunes peu évoluées se situant respectivement sur les communes de Geloux, Brocas et Vert. Les 3 photos suivantes correspondent à des photos de lagunes évoluées plus ou moins envahies par la molinie et la bourdaine (Geloux, Cere et Luxey).



Geloux



Brocas



Vert



Geloux



Cere



Luxey

Illustration 3 : Photographies prises le 5 avril 2013

D'un point de vue de la faune, les lagunes présentent des habitats d'une grande diversité. La grande faune est représentée par les sangliers, les cerfs et les chevreuils et la petite faune par les micromammifères tels que le campagnol amphibia.

On trouve aussi des cortèges d'amphibiens ainsi que des reptiles (lézard vivipare ou couleuvre à collier). Les insectes sont représentés par les libellules mais aussi par les papillons et les orthoptères dans les secteurs de landes à molinie.

Certaines lagunes constituent également des zones d'hivernage pour certains oiseaux d'eau (canards, chevaliers.....).

Au niveau floristique, les lagunes se caractérisent schématiquement par la présence de ceintures végétales spécifiques disposées en fonction du niveau topographique.

De façon générale, chacune ceinture est dominée par une espèce (cf. Illustration 4) :

- la molinie sur la ceinture périphérique,
- puis la ceinture à agrostis des chiens,
- puis la ceinture à éléocharis à nombreuses tiges,
- puis celle à millepertuis des marais,
- et enfin une zone aquatique souvent dominée par le potamot à feuilles de renoué.

Les habitats de bas niveau et amphibiens sont rares et localisés et possèdent à ce titre une valeur patrimoniale forte. On recense en particulier le faux cresson de Thore, espèce sub-endémique des zones humides.

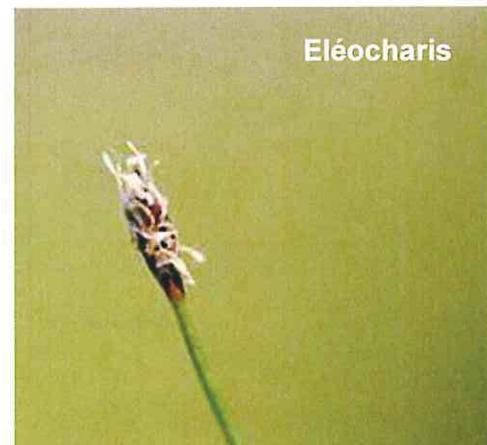


Illustration 4 : Espèces végétales couramment observées au droit des lagunes

1.3. ORIGINE DES LAGUNES

Trois hypothèses sont couramment admises pour la formation des lagunes.

1.3.1. L'origine karstique ou cryptokarstique

La dissolution des roches carbonatées par les eaux météoritiques peut provoquer la formation de cavités (Illustration 5). Si ces roches sont surmontées de sédiments meubles superficiels, ces derniers sont peu à peu aspirés dans les espaces vides et le couplage dissolution/remplissage sera à l'origine d'une doline allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres de diamètre. On parlera alors de doline d'affaissement si la couverture est sableuse et de doline d'effondrement, si la couverture est argileuse.

La formation de dolines reste néanmoins dépendante de l'épaisseur de la couverture (SINCLAIR & STEWART, 1985). Si l'épaisseur du recouvrement est inférieure à 10 mètres, il y a peu de chances que des dolines se développent. Dans les contextes où l'épaisseur de la couverture est comprise entre 10 et 60 mètres, les dolines peuvent être relativement nombreuses. Au-delà, les dolines restent très rares mais sont potentiellement dangereuses du fait de leur profondeur.

Dans le département des Landes, les formations du Plio-Quaternaire de nature essentiellement sableuses présentent des épaisseurs comprises entre 10 et 80 mètres donc a priori propices à la formation de dolines d'affaissement mais la nature peu karstique des formations sous-jacentes (marnes, calcaires et grès du Miocène) laisse supposer que la plupart des lagunes des Landes ne sont pas issues de ce mode de formation.

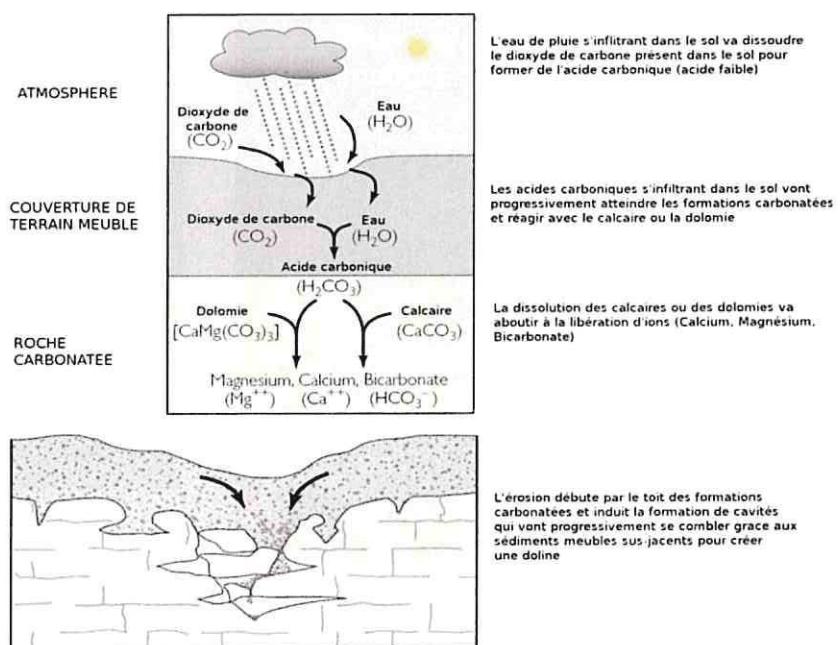


Illustration 5 : Schéma illustrant l'origine karstique ou cryptokarstique possible des lagunes landaises (d'après Galloway et al., 1999)

Il est à noter que cette origine a par contre été retenue pour les lagunes rencontrées dans le secteur de Villagrains-Landiras au sud de la Gironde (Saltet, 2008 ; L'écho des Faluns, Saucats, n°35-36). Dans ce secteur, les lagunes présentent en effet des alignements correspondant aux directions tectoniques majeures régionales : N10°, N70° à 75° et N100°-N110° et les formations carbonatées sont à l'affleurement ou sous une couverture peu épaisse.

De façon générale, les lagunes de ce type présentent des formes circulaires et se remplissent grâce aux précipitations et/ou à la nappe qui affleure.

1.3.2. L'origine périglaciaire ou thermokarstique

Les lagunes d'origine périglaciaire ou thermokarstique sont liées à la dernière période de glaciation dite du Würm (maximum de glaciation daté de 20 000 ans, fin de la période datée de 10 000 ans). Le processus de formation repose sur la dilatation de l'eau lorsqu'elle gèle et sur les cycles de gel et dégel du pergélisol.

Des pingos (Illustration 6) se forment lorsqu'un sol gorgé d'eau se retrouve en contact avec le froid et gèle. L'eau sous pression contenue dans le sol se regroupe sous la forme d'une lentille de glace, se dilate et soulève le pergélisol qui le recouvre.

D'années en années, le pingo grossit par apport successif d'eau venant du sol. On assiste alors à la naissance d'une colline dont le cœur est formé de glace, recouverte d'une couche de pergélisol et pouvant comporter à son sommet un petit lac formé de l'eau de fonte de la glace du pingo qui se retrouve à l'air libre.

Lorsque l'érosion dégage la glace du pingo, celle-ci se met à fondre. Le pingo se transforme alors en un lac ou une dépression bordée par un talus formé des anciens terrains recouvrant le pingo (Illustration 7).



Illustration 6 : Exemples de pingos canadiens

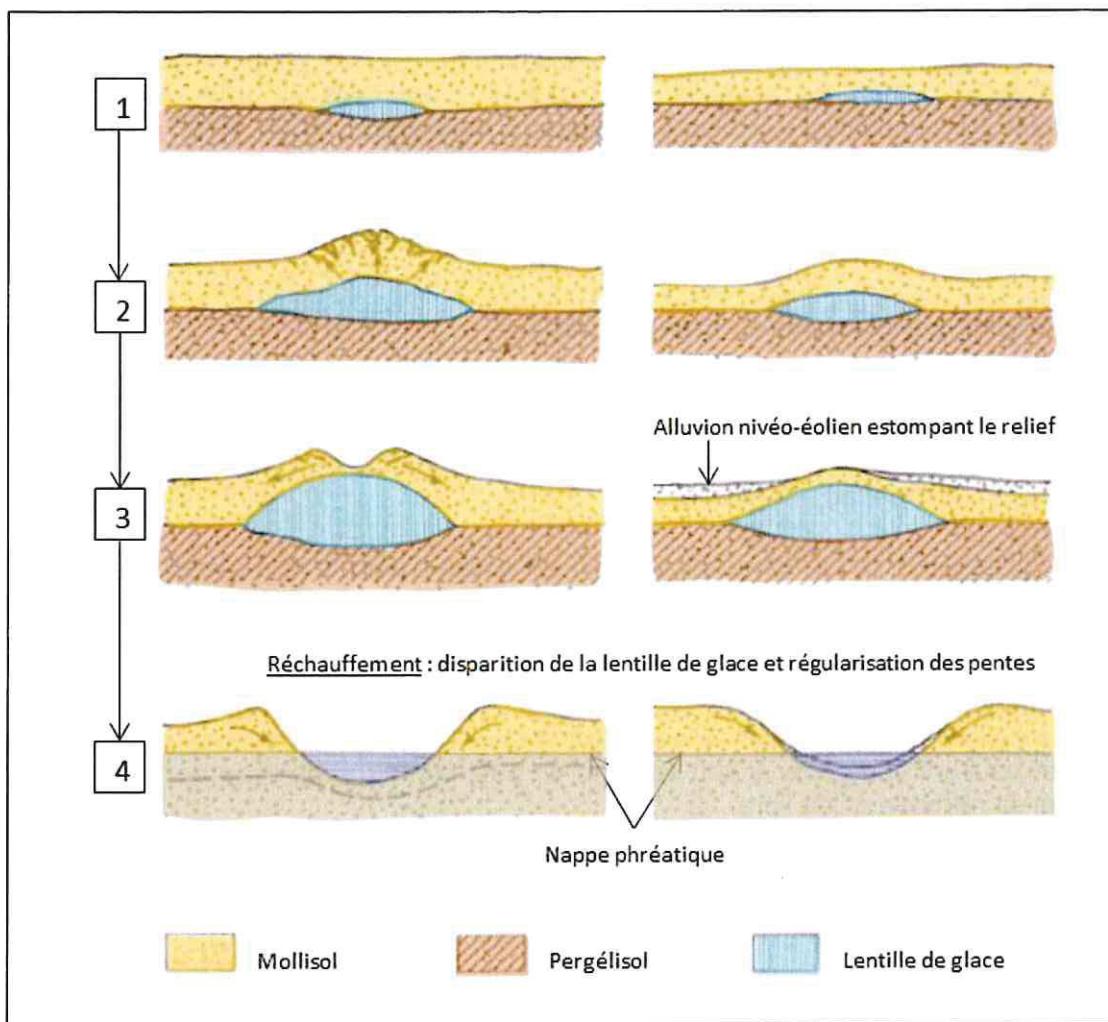


Illustration 7 : Schéma illustrant l'origine périglaciaire ou thermokarstique possible des lagunes landaises (d'après Legigan, 1979)

Il est couramment admis que les pingos ne peuvent se former que lorsque le pergélisol est continu (au moins 80% de la surface du sol gelée).

Dans le cas des Landes, la présence d'un pergélisol continu au Würm n'est pas reconnue (Illustration 9). Des structures sédimentaires typiques des périodes de glaciation tels que des coins de glace ou des sols polygonaux (sols abîmés en raison des contractions thermiques) (Illustration 8) ont néanmoins été identifiés plus au nord (Lac Bleu au sud de Bordeaux et Haut-Médoc), ce qui témoigne d'une telle présence au moins temporaire (3 incursions supposées lors des 40 000 dernières années par Lenoble et al., 2012).

Dans ses travaux de thèse, M. Saltel (2008) évoque aussi la création possible de palses correspondant à des buttes cryogènes se développant au droit de marais en zone de pergélisol discontinu. Ces « remparts » qui ont pu être éliminés par la suite par l'érosion éolienne pourraient être à l'origine des lagunes actuelles. Cette hypothèse reste néanmoins à valider.

Compte tenu de ces observations, l'hypothèse d'une origine périglaciaire ou thermokarstique ne peut pas être totalement écartée. Elle ne constitue toutefois probablement pas le mode de formation majeur.

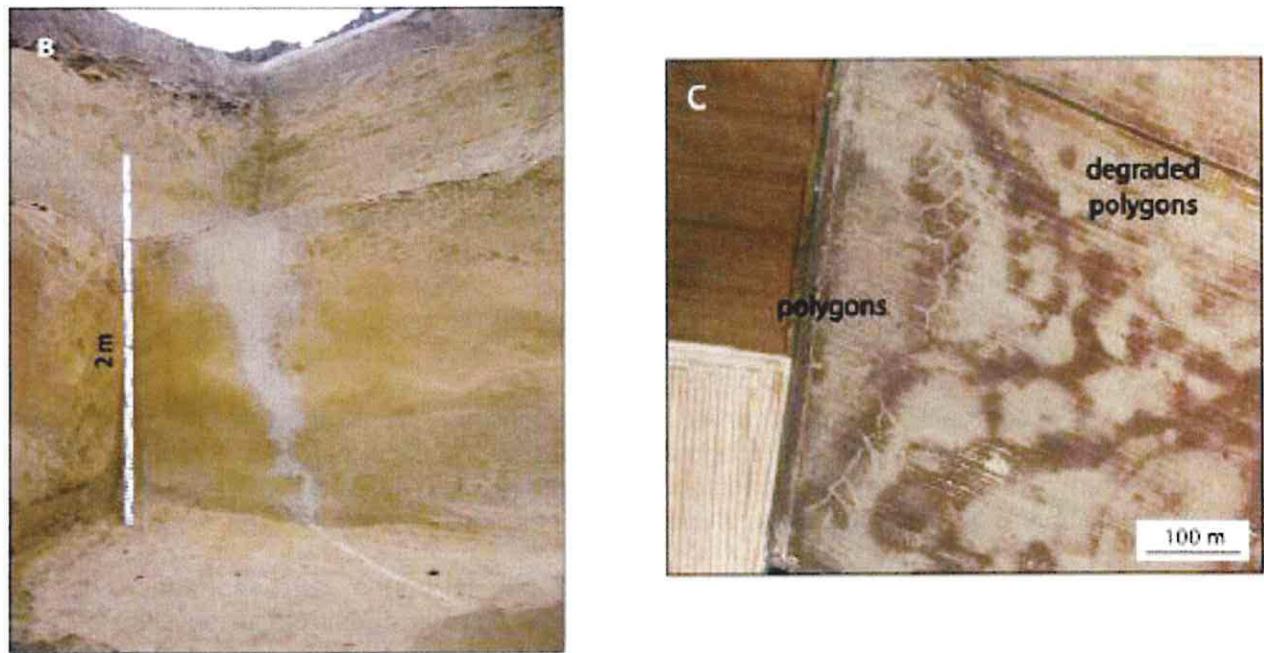


Illustration 8 : Coin de glace et sols polygonaux

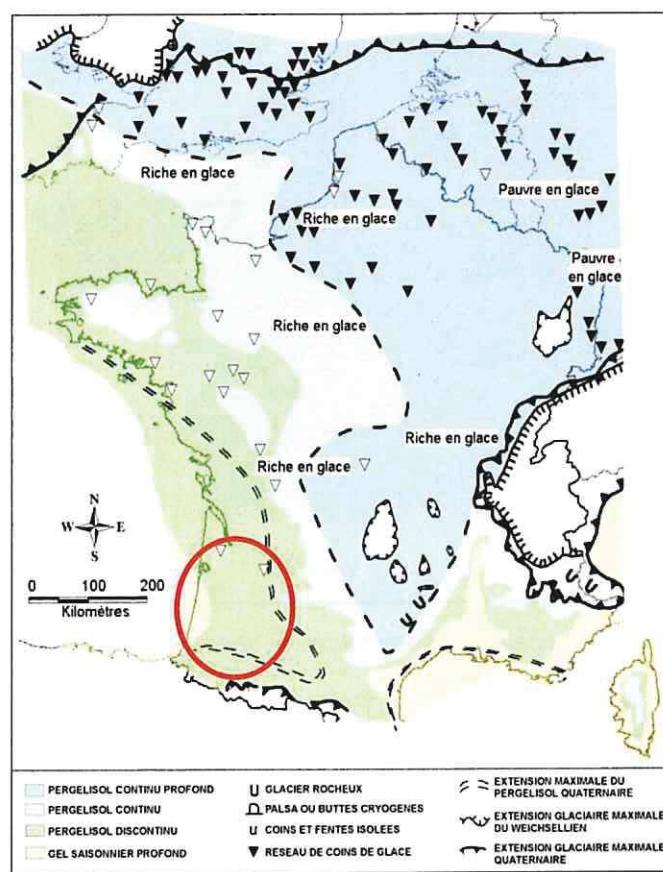


Illustration 9 : Extension du pergélisol en France au Dernier Maximum Glaciaire (20000 BP) d'après Van-Vliet-Lanoë, 2000

1.3.3. L'origine éolienne

L'origine éolienne constitue la 3^{ème} hypothèse possible pour la formation des lagunes.

La thèse de Lucas SITZIA et le rapport du JQS (Journal of Quaternary Science) renseignent sur la formation des dunes notamment des dunes continentales des Landes. Ils expliquent que les transports éoliens ont été très importants pendant les derniers petits âges glaciaires (PAG) mais c'est pendant le Pléniglaciaire supérieur (entre 15 000 et 27 000 ans) que la plupart des dunes des Landes se sont formées (13 000 km² de sables remaniés). Durant l'Holocène (les 10 000 dernières années), un phénomène de réactivation a abouti à la formation des dunes paraboliques actuelles.

En ce qui concerne l'âge des lagunes, des datations au ¹⁴C de tourbes ont montré qu'elles étaient contemporaines des petits âges glaciaires de l'Holocène (de 5 000 ans avant JC à maintenant) et non de la grande glaciation du Würm (20 000 ans avant JC.) (FAURE & GALOP, 2011), ce qui discrédite l'hypothèse d'une origine périglaciaire pour les lagunes landaises.

L'origine éolienne est, quant à elle, confortée par la bonne correspondance des zones d'extension des dunes continentales et des lagunes dont la quasi-totalité se situe au nord de l'Adour (Illustration 10).

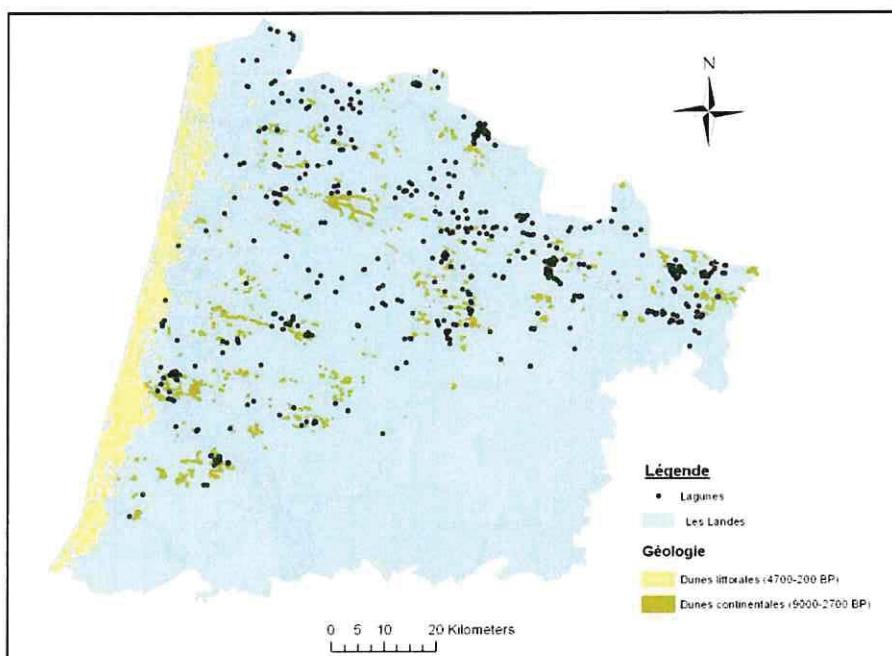


Illustration 10 : Localisation des dunes et des lagunes dans les Landes

Parmi ces lagunes continentales, Lucas SITZIA en distingue 2 types : celles dont le niveau dépend du niveau de la nappe superficielle et celles dont le niveau dépend des précipitations.

Pour les premières (Illustration 11), c'est l'érosion éolienne qui a provoqué des creusements en aval des dunes. Ces creux de déflation se remplissent d'eau plus ou moins temporairement en fonction de leur profondeur et du niveau de la nappe.

Les secondes se situent en amont des dunes (Illustration 12). Leur formation n'est possible que si la dune se situe au droit d'une pente. Dans ces conditions, la dune joue le rôle de barrage et retient les eaux de pluie.

Les 2 illustrations suivantes montrent que les lagunes d'origine éolienne présentent des formes beaucoup plus irrégulières que celles qui sont d'origine karstique ou cryptokarstiques (contours circulaires en lien avec la forme des dolines).

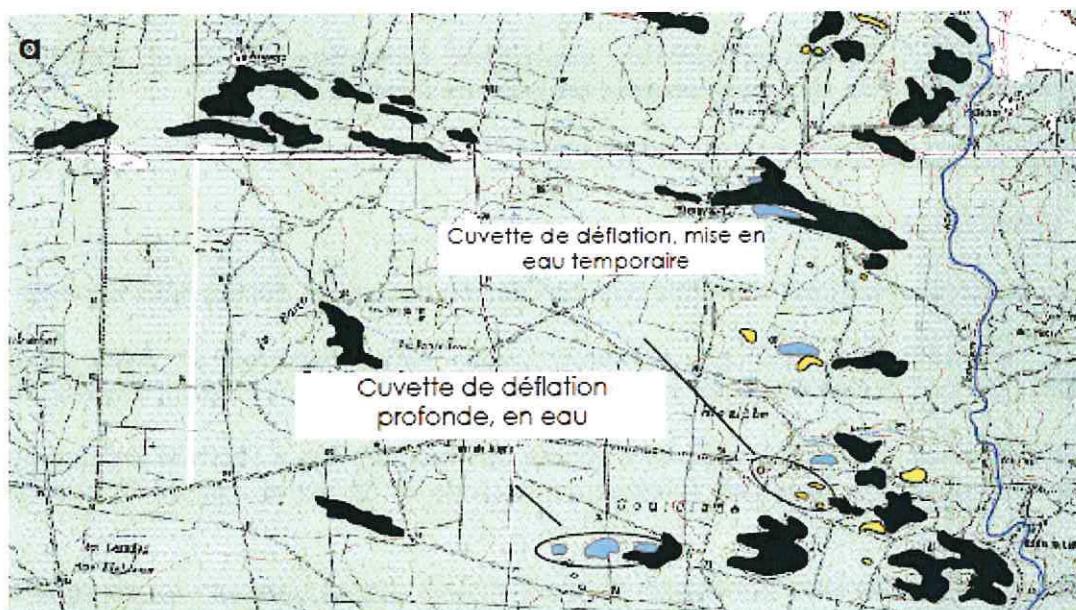


Illustration 11 : Lagunes en aval des dunes

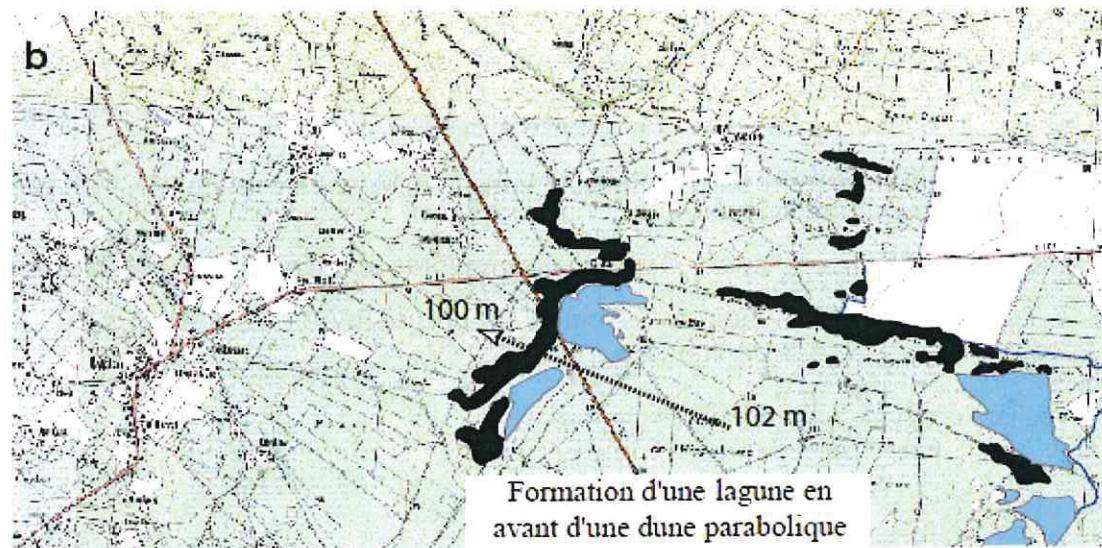


Illustration 12 : Lagunes en amont des dunes

1.3.4. Bilan

Parmi les 3 mécanismes qui peuvent être à l'origine de la formation des lagunes landaises, l'origine périglaciaire ou thermokarstique constitue l'hypothèse la moins probable (absence d'un pergélisol continu, datations de tourbe qui ont mis en évidence des âges plus récents que la fin de la dernière glaciation...). Elle ne peut toutefois pas être totalement écartée.

Si l'origine karstique est retenue par certains auteurs (Texier, 2011), les derniers travaux universitaires (Sitzia, 2014) retiennent plutôt l'origine éolienne.

En fait, seuls de nouveaux travaux pourraient permettre de lever définitivement l'ambiguïté sur l'origine de ces systèmes morpho-sédimentaires.

1.4. METHODOLOGIE D'ETUDE RETENUE

1.4.1. Généralités

Le plan du présent rapport est conforme à la succession des volets décrits dans la partie 1.1.

Après un examen des données pluviométriques, hydrométriques et hydrogéologiques disponibles, la morphologie des sites et leur environnement géologique seront étudiés.

Les chapitres suivants seront consacrés à l'étude des facteurs liés à l'activité anthropique ainsi qu'aux expérimentations de terrain (prélèvements d'eau et de sol et instrumentation d'un site pilote).

La conclusion précisera les principales caractéristiques des lagunes et proposera si cela est possible un modèle de fonctionnement schématique.

1.4.2. Tests statistiques

Dans le cadre de l'examen des données pluviométriques, hydrométriques et hydrogéologiques réalisé dans les 3 chapitres suivants, des tests statistiques "non paramétriques" (aucune hypothèse sur la distribution des données) ont été utilisés :

- le test de **Mann-Kendall** pour détecter une éventuelle tendance monotone au sein d'une série de valeurs indépendantes,
- le test de **Pettitt** pour détecter d'éventuelles ruptures au sein de cette même série,
- le test de **Sen** pour estimer la pente de la droite de tendance qui caractérise éventuellement la série de données.

Le détail de ces méthodes est donné en annexe 1.

2. Analyse des facteurs climatiques

Dans le cadre de la caractérisation des lagunes et de l'étude des facteurs pouvant être à l'origine de la disparition de certaines d'entre elles, l'analyse de l'évolution du climat et en particulier des températures et des précipitations constitue un préalable.

Les paragraphes suivants font état de travaux récents menés sur le changement climatique et du traitement statistique des séries de données achetées auprès de Météo France pour la période 1958 à 2012 sur le poste de Mont-de-Marsan (températures moyennes mensuelles et précipitations mensuelles homogénéisées).

Pour plus de détails sur l'homogénéisation des données climatiques, le lecteur pourra se référer à l'annexe 2 du présent rapport.

2.1. LES TEMPERATURES

La figure suivante, publiée par l'ONERC, permet de visualiser l'augmentation des températures annuelles sur la période 1901-2000 en France métropolitaine. Il apparaît que le département des Landes se caractérise par une augmentation de 1,1 °C sur la période considérée, ce qui correspond au maximum des valeurs calculées.

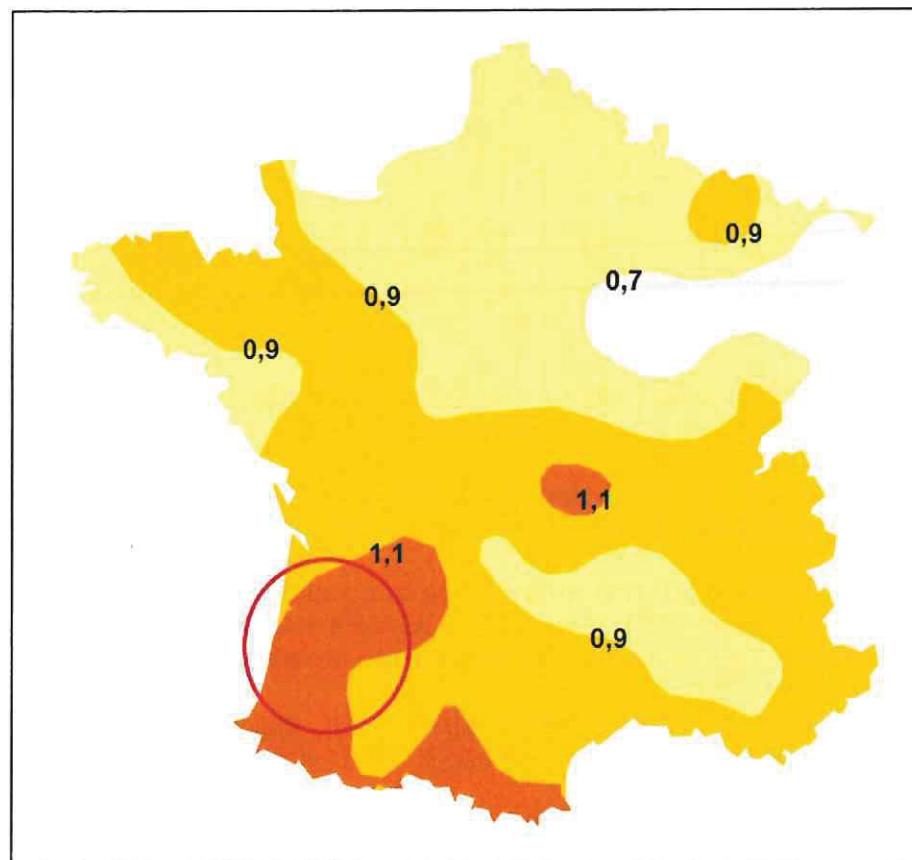


Illustration 13 : Augmentation des températures annuelles sur la période de 1901-2000 (source ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique)

A l'échelle régionale, un travail coordonné par Hervé LE TREUT et visant à étudier les conséquences du changement climatique au niveau de l'Aquitaine a abouti à la publication en 2013 de l'ouvrage « Prévoir pour agir ». La figure suivante issue de ce rapport met en évidence une augmentation des températures de l'ordre de 1,5 °C sur la période 1900-2006 au droit du département des Landes, ce qui concorde avec les résultats précédents.

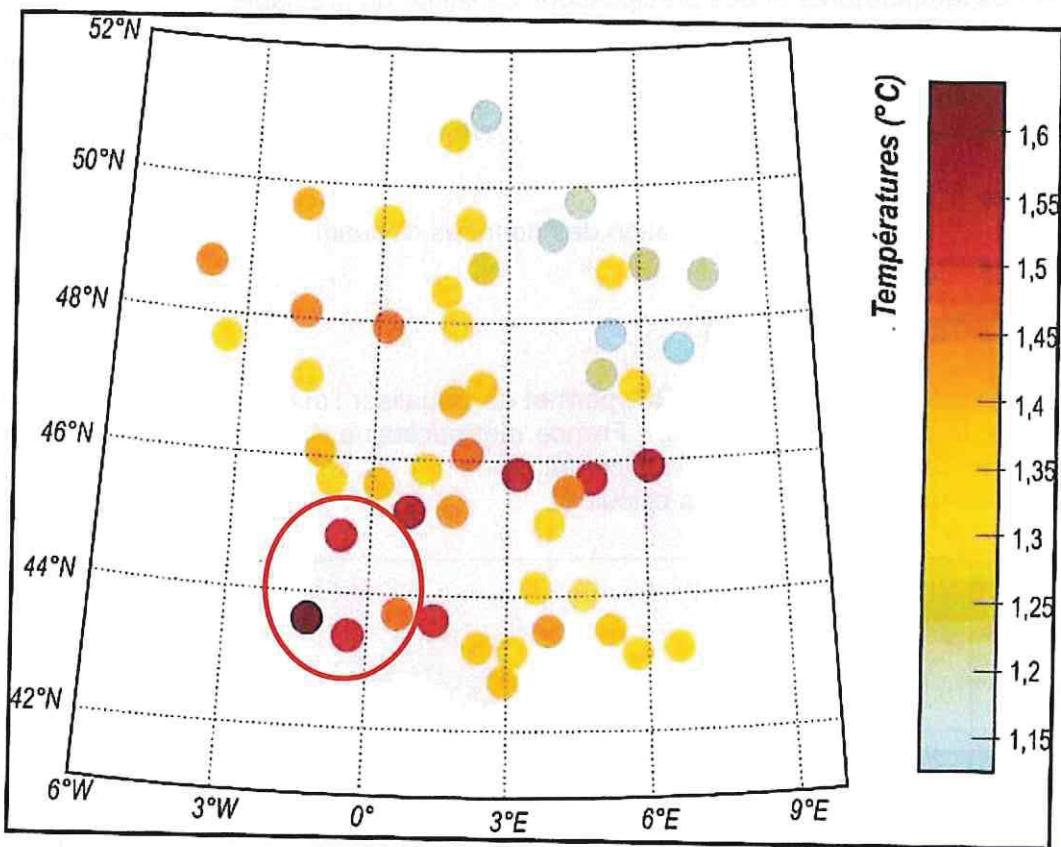


Illustration 14 : Evolution des températures moyennes sur la période 1900-2006 (d'après « Prévoir pour agir », 2013)

Les températures moyennes mensuelles achetées auprès de Météo France pour la période 1958-2012 ont permis de calculer des températures moyennes annuelles (Illustration 15).

Le test de Pettitt (Illustration 16) met en évidence une rupture en 1987 avec une moyenne de 12,8 °C sur la période 1958-1987 et de 13,7°C au-delà (1988-2012). Il apparaît donc que le réchauffement climatique aurait connu une accélération à partir de cette année « seuil ».

Le test de Man-Kendall (Illustration 16) a, quant à lui, logiquement mis en évidence une tendance à la hausse des températures, estimée à 1,4 °C sur la période considérée.

Les données bibliographiques et le traitement statistique des données relatives à la station de Mont-de-Marsan montrent donc que la température a augmenté d'environ 1,5°C lors du dernier siècle sur le département des Landes avec un phénomène qui se serait accentué lors des 25 dernières années (+ 1°C environ sur cette période).

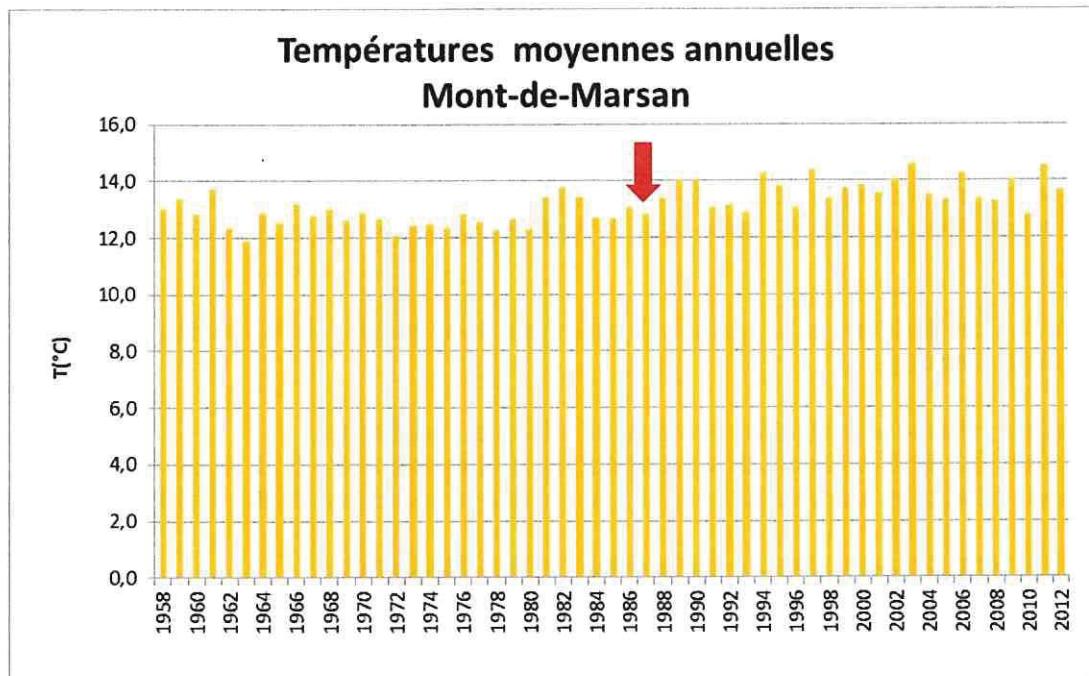


Illustration 15 : Evolution des températures moyennes annuelles sur la période 1958-2012

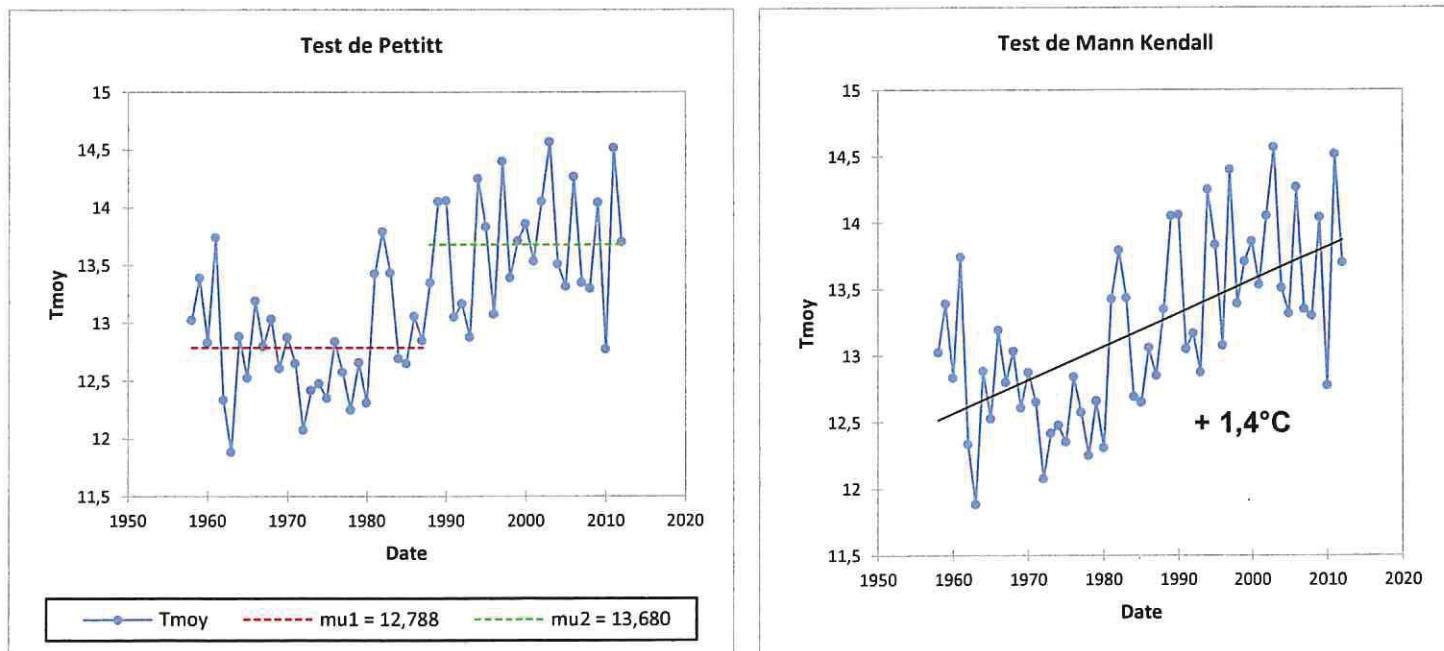


Illustration 16 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux températures moyennes annuelles relatives au poste de Mont-de-Marsan

2.2. LES PRECIPITATIONS

En ce qui concerne les précipitations, des documents produits par Météo France permettent de visualiser l'évolution des cumuls lors du siècle dernier (Illustration 17).

L'illustration 17 ne concerne pas le département des Landes mais des informations sont disponibles pour les départements voisins de la Gironde (au nord) et des Pyrénées Atlantiques (au sud).

A l'exception de l'automne, il apparaît que les tendances sont identiques pour ces 2 départements, à savoir :

- pas d'évolution significative des précipitations au printemps,
- une tendance à la baisse des précipitations (comprise entre 5 et 15 %) en été,
- une tendance à l'augmentation des précipitations (comprise entre 5 et 15 %) en hiver.

On retiendra donc ces tendances pour le département des Landes.

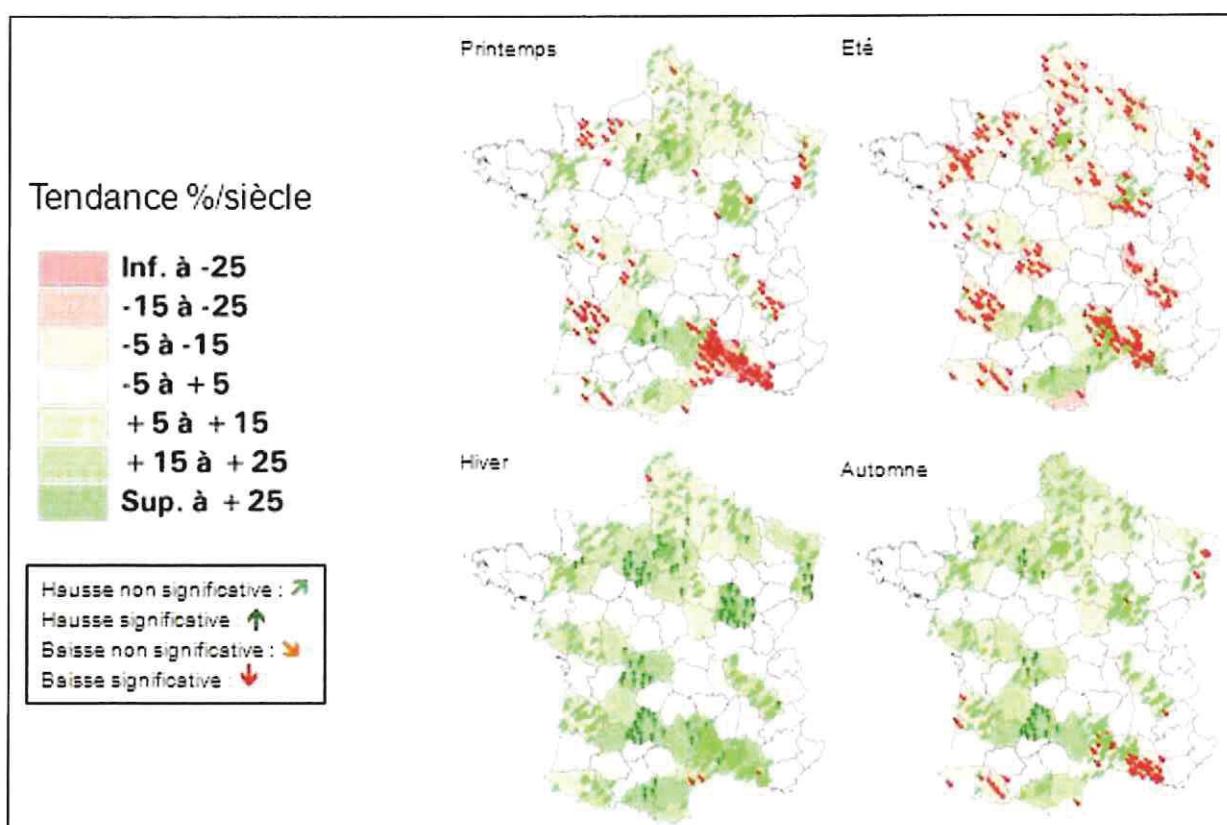


Illustration 17 : Tendance des précipitations saisonnières 1901-2000 d'après Météo France

Les travaux récents menés par le BRGM en vue de l'établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact climatique sur les eaux souterraines (Vernoux et al., 2011, 2012 et 2013) ont comporté une analyse des précipitations et des niveaux piézométriques à l'échelle de la France. Aucun point de contrôle ne concerne toutefois le département des Landes.

En ce qui concerne les départements de la Gironde et des Pyrénées Atlantiques, un seul poste pluviométrique (Mérignac) sur les 17 étudiés présente une tendance significative à la baisse. Il en va de même pour le seul piézomètre de référence pris en compte.

Les précipitations mensuelles homogénéisées achetées auprès de Météo France pour la période 1958-2012 sur le poste de Mont-de-Marsan ont permis de calculer les cumuls annuels (Illustration 18).

Le test de Pettitt (Illustration 19) ne met pas en évidence de rupture particulière dans la série de données. Le test de Man-Kendall (Illustration 19) a, quant à lui, mis en évidence une tendance à la baisse des précipitations, estimée à 113 mm sur la période considérée (54 ans).

Appliqués à une période plus récente (1990-2012), les mêmes tests mettent en évidence une rupture assez brutale à partir de l'an 2000 avec un passage d'une moyenne de 989 à 825 mm (Illustration 20). Cette baisse est confirmée par le test de Mann-Kendall (baisse estimée à 221 mm sur les 22 ans).

Afin de compléter l'analyse, les périodes d'inventaire des lagunes (1983 à 1994 et 2005 à 2008) ont été représentées sur l'Illustration 18. Si l'évolution défavorable du nombre de lagunes observée entre 1983 et 1994 paraît difficilement explicable par l'évolution des conditions climatiques, la disparition des 91 lagunes entre 1994 et 2005-2008 pourrait s'expliquer par des contextes de réalisation très différents (plutôt humide entre 1990 et 1994 et plutôt sec à partir de 2001).

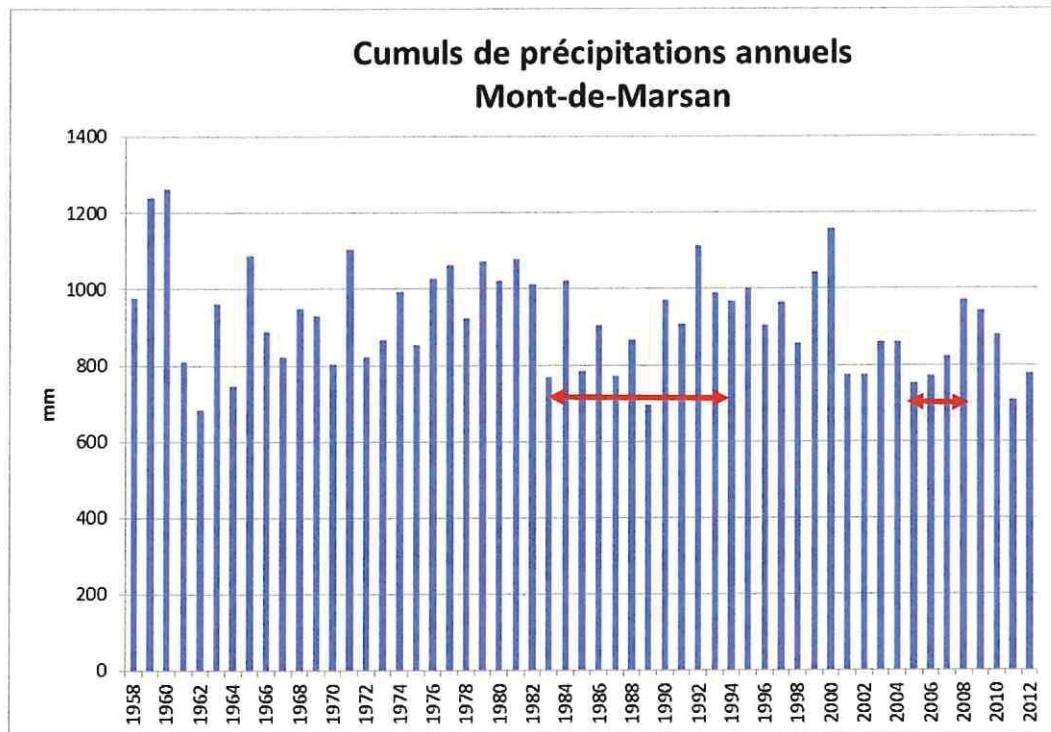


Illustration 18 : Cumuls annuels de précipitations sur la période 1958-2012

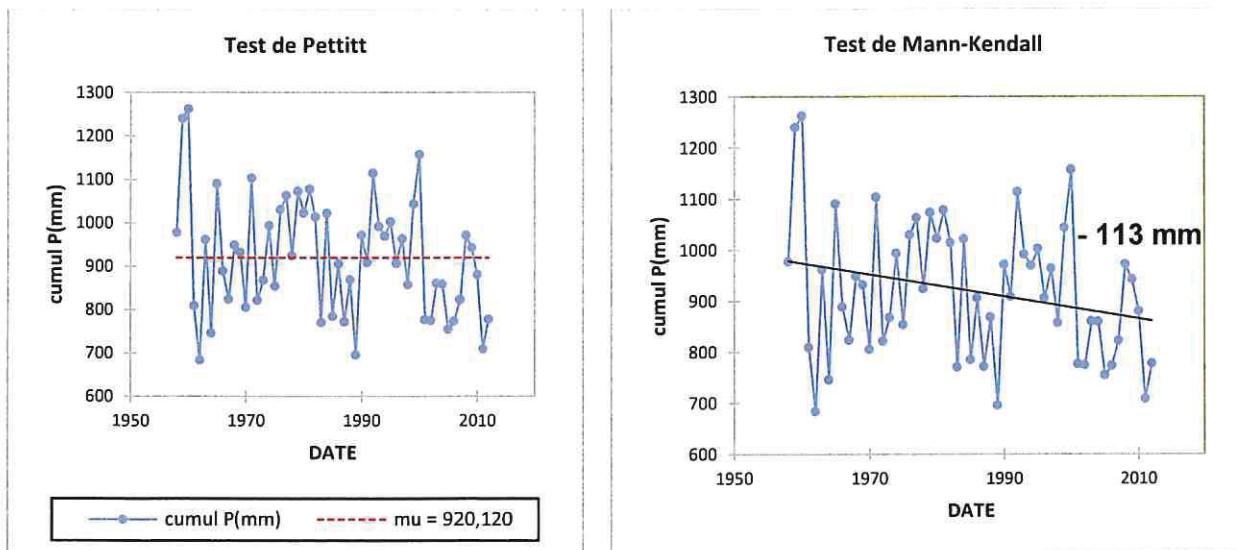


Illustration 19 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux cumuls annuels de précipitations sur le poste de Mont-de-Marsan (période 1958-2012)

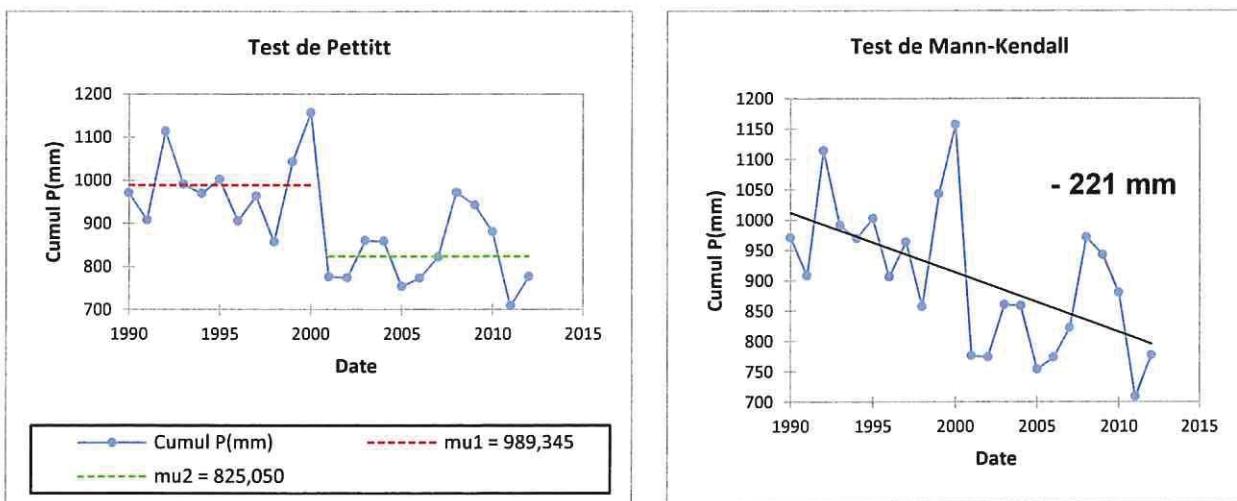


Illustration 20 : Tests de Pettitt et Mann-Kendall appliqués aux cumuls annuels de précipitations sur le poste de Mont-de-Marsan (période 1990-2012)

Les données bibliographiques et le traitement statistique des données relatives à la station de Mont-de-Marsan montrent donc que les précipitations ont diminué depuis la fin des années 1950 avec un phénomène qui se serait particulièrement accentué depuis l'année 2000 (cumul moyen observé sur la période 2000-2012 inférieur de 17% au cumul moyen observé sur la période 1990-2000).

2.3. BILAN

L'analyse des facteurs climatiques réalisée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence une évolution défavorable des températures et des précipitations sur le maintien des lagunes au droit du département.

L'augmentation des températures contribue en effet à augmenter l'évaporation au sein des lagunes et la diminution des précipitations, à limiter leur alimentation directe.

Si ces facteurs ne sont probablement pas les seuls à l'origine de la disparition des lagunes, ils constituent une hypothèse à ne pas écarter, en particulier pour les milieux les plus vulnérables (lagunes de faible profondeur ou non connectées à la nappe en particulier).

Il convient en tout cas de retenir que les inventaires de lagunes ont été réalisés dans des contextes climatiques très différents : humide dans les années 1990 et sec sur la période 2005 à 2008.

Plus récemment, l'impact des conditions climatiques sur le fonctionnement des lagunes a pu être observé avec la réapparition de zones humides au droit de lagunes asséchées suite aux très fortes précipitations de 2013 (ex : lagune de Cere).

3. Synthèse des données hydrologiques

Une synthèse des données hydrologiques disponibles sur le département des Landes a été réalisée dans l'objectif de mettre en évidence un éventuel impact de l'évolution négative des facteurs climatiques sur les eaux de surface.

Les données relatives aux 28 stations hydrologiques des Landes ont été téléchargées depuis la Banque Hydro. Elles ont permis d'établir l'Illustration 21 qui permet de visualiser les périodes de suivi des différentes stations.

Il apparaît que la répartition géographique de ces stations n'est pas homogène (Illustration 22). Elles concernent en effet essentiellement la Midouze et l'Adour et leurs affluents (peu de stations sur les cours d'eau côtiers).

Les débits mesurés sur l'Adour à Saint-Vincent-de-Paul ont fait l'objet d'une étude détaillée. Cette station ne se situe pas sur le plateau landais à proprement parlé mais elle a été choisie pour la longueur de sa chronique (46 ans de données) et pour son rôle intégrateur (plus fort débit jaugé après l'Adour à Dax dont le suivi n'a démarré qu'en 2010). Par l'analyse de ces données, il s'agit de voir si les modalités d'écoulement ont varié lors des 50 dernières années au droit du département des Landes.

L'Illustration 23 représente l'évolution du débit moyen annuel et du débit médian annuel. Sur la période considérée, la moyenne de ces débits atteint 90 m³/s pour le premier et 74 m³/s pour le second.

L'Illustration 24 représente quant à elle, l'évolution du débit moyen annuel en fonction du cumul des précipitations à Mont-de-Marsan. La corrélation des paramètres n'est pas forcément très bonne. Elle peut s'expliquer par l'impact différentiel des pluies en fonction de la période à laquelle elles tombent (fort impact des précipitations sur les débits lorsque les sols sont saturés en eau, impact plus limité le reste du temps).

En ce qui concerne les ruptures et tendances, les tests ont été appliqués aux valeurs de débits annuels médians de façon à s'affranchir des valeurs extrêmes (Illustration 25).

Le test de Pettitt met en évidence une rupture en 1982 avec une moyenne de 93 m³/s sur la période antérieure et une moyenne de 64 m³/s sur la période postérieure à cette date.

De façon plus globale, le test de Mann-Kendall met en évidence une tendance à la baisse des débits relativement marquée avec une baisse de l'ordre de 40 m³/s entre 1968 et 2012 (valeur déterminée par le test de Le Sen).

Si la baisse des précipitations mise en évidence dans le chapitre précédent peut être à l'origine de la diminution des débits observée, il convient de noter que le volume de stockage des eaux superficielles sur le bassin Adour-Garonne a fortement augmenté depuis les années 1980 (Illustration 26).

A l'heure actuelle, sur les 640 millions de m³ mobilisables, près de 300 millions de m³ sont stockés dans de grands réservoirs et sont dédiés au soutien des étiages, près de 50 millions de m³ sont stockés dans des retenues de capacité moyenne (0,5 à 1 million de m³) et sont dédiés à l'irrigation et/ou à l'eau potable et près de 290 millions de m³ sont stockés dans 15 000 retenues collinaires ou retenues de substitution.

L'Illustration 26 montre que le bassin de l'Adour est particulièrement concerné par ces stockages, ce qui rend crédible l'hypothèse de leur contribution dans la baisse des débits observée à Saint-Vincent-de-Paul. Il semblerait même que cela en soit la cause principale.

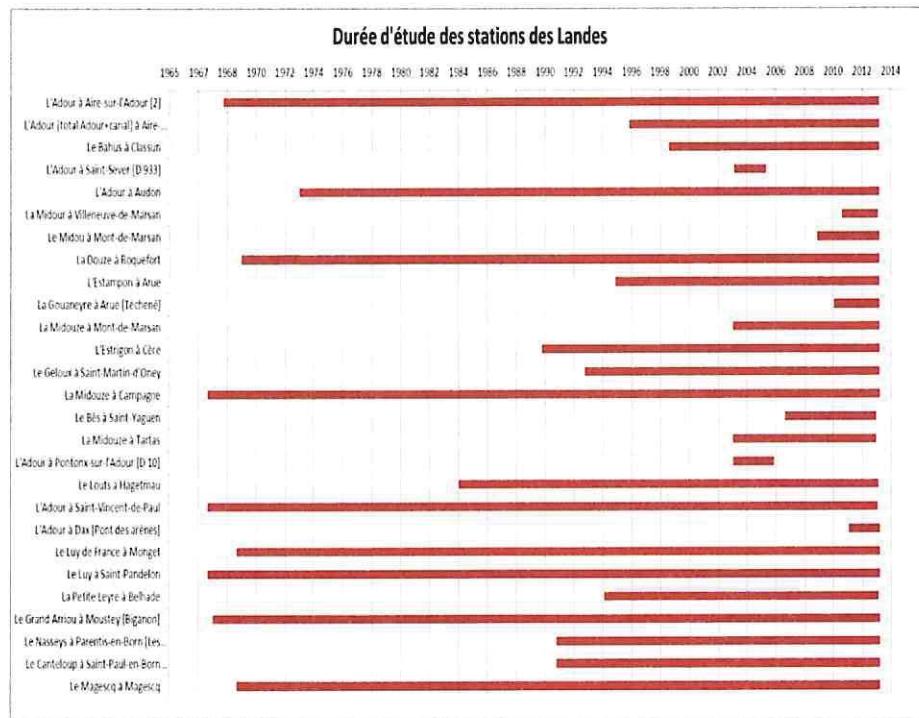


Illustration 21 : Périodes de suivi des stations hydrométriques des Landes

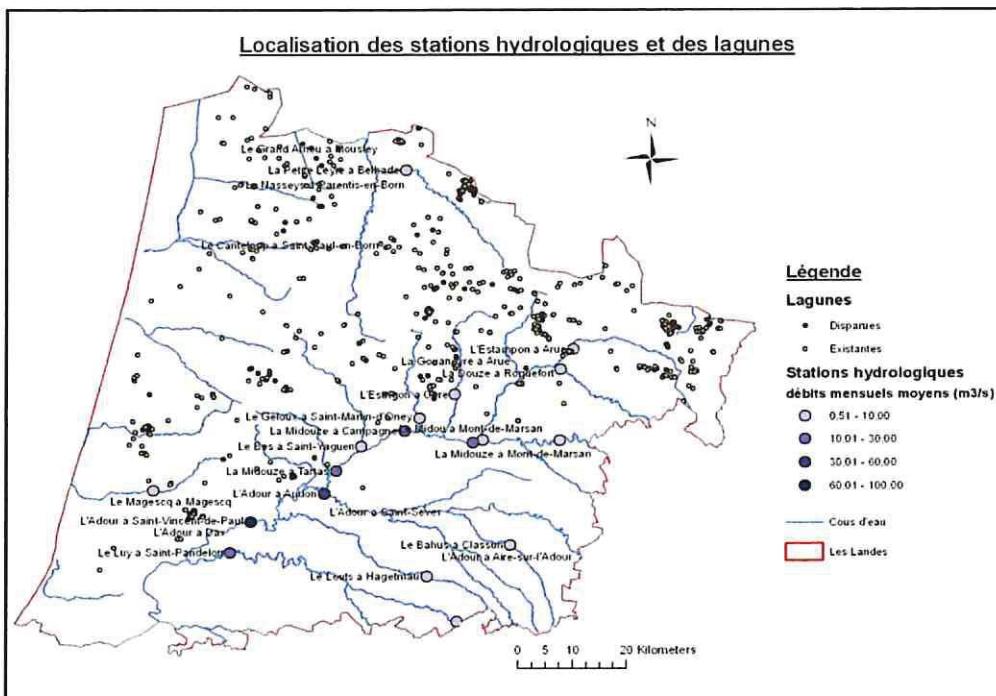


Illustration 22 : Localisation des stations hydrométriques et débits mensuels moyens associés

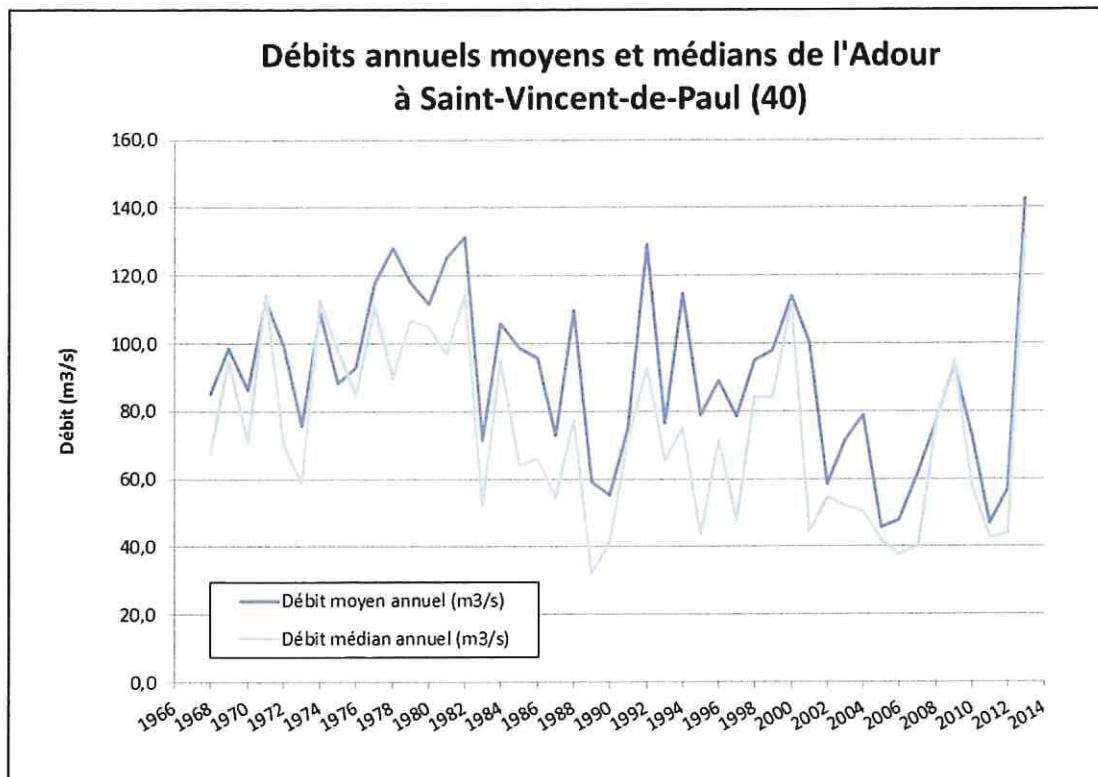


Illustration 23 : Evolution des débits annuels moyens et médians de l'Adour à Saint-Vincent-de-Paul (40)

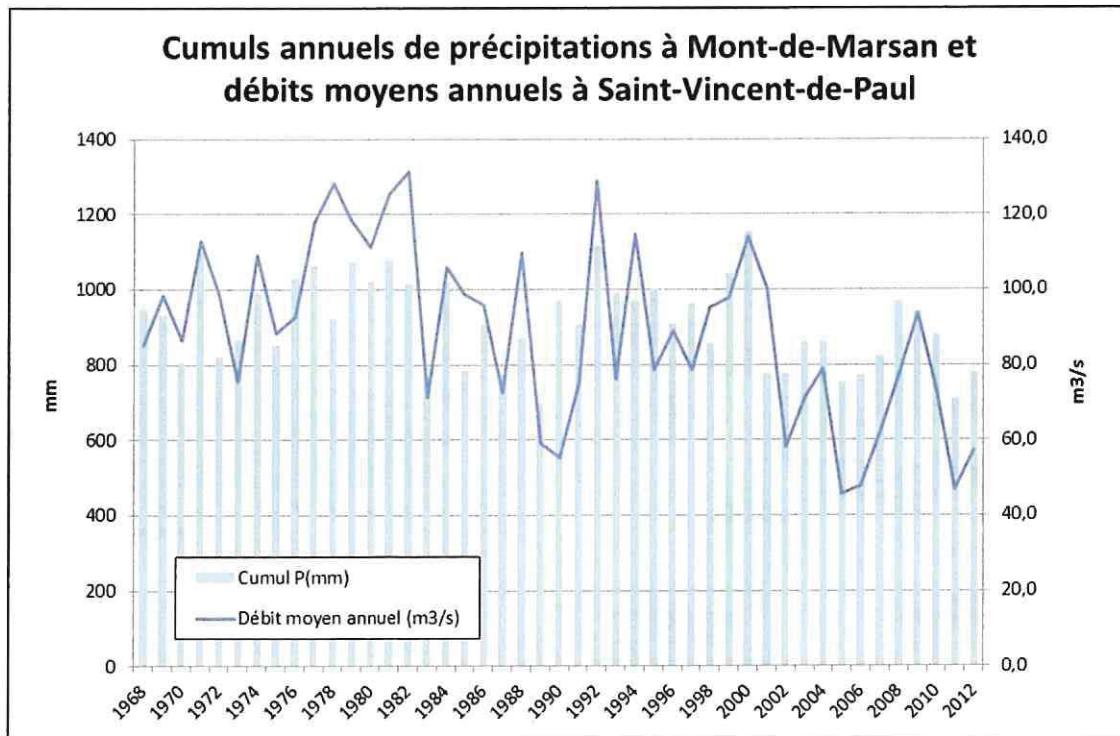


Illustration 24 : Mise en parallèle des cumuls annuels de précipitations à Mont-de-Marsan et des débits moyens annuels à Saint-Vincent-de-Paul

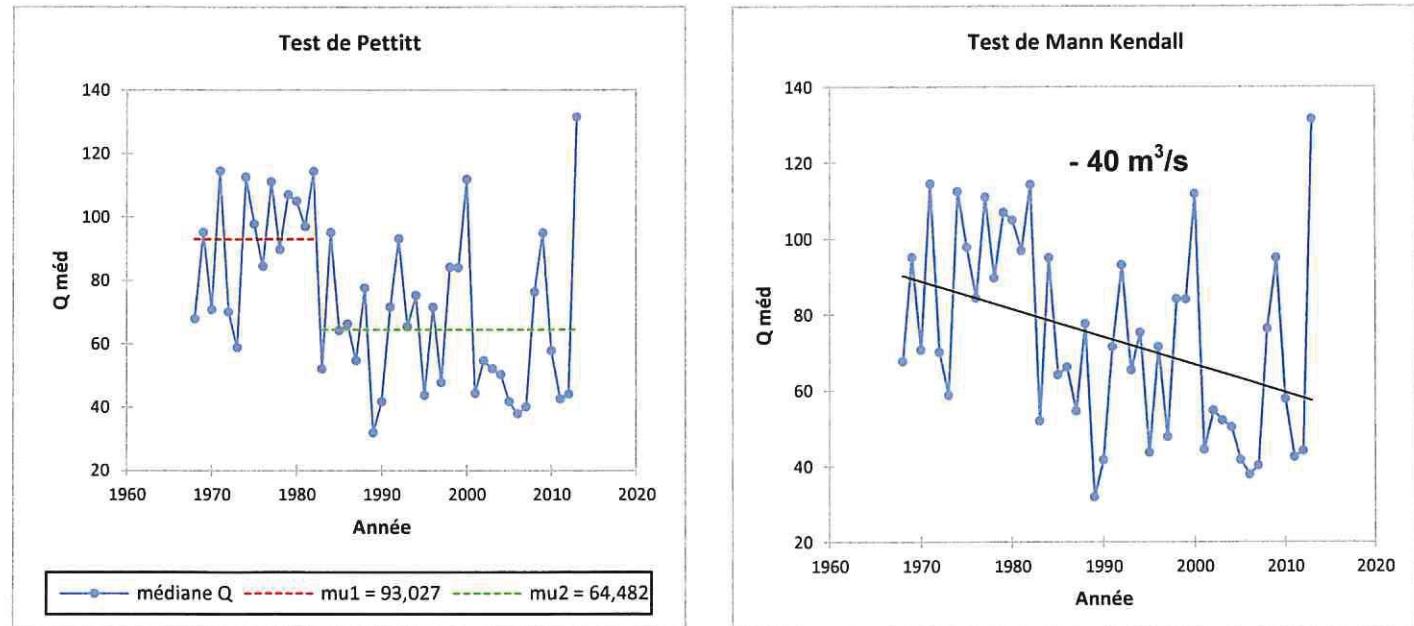


Illustration 25 : Tests de Pettitt et Man-Kendall sur les débits médians annuels

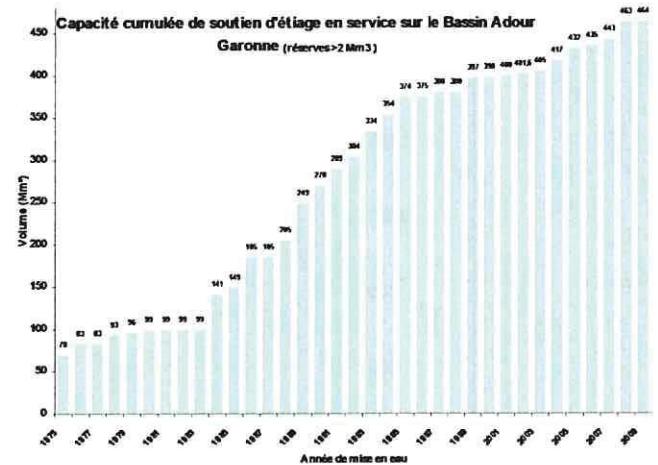
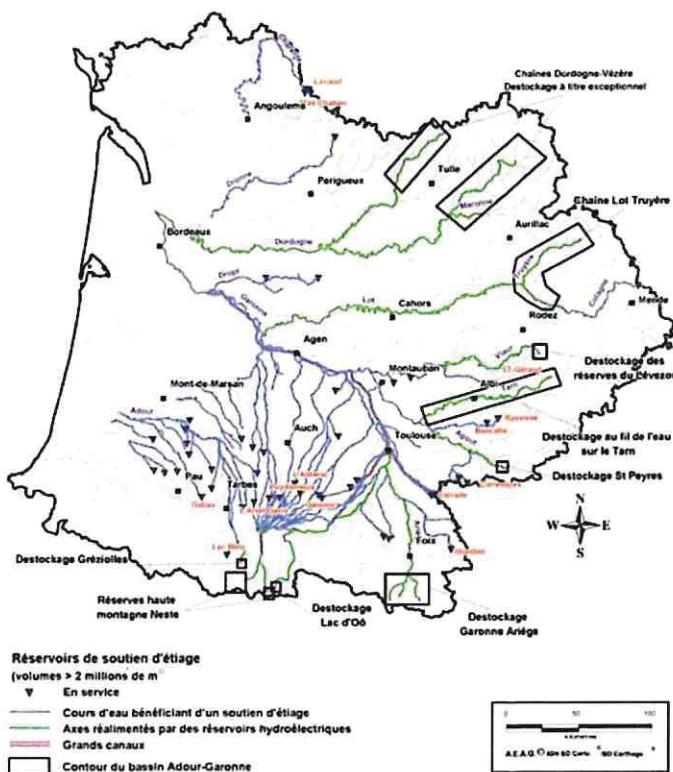


Illustration 26 : Informations relatives au stockage des eaux superficielles sur le bassin Adour-Garonne d'après www.eau-adour-garonne.fr

4. Synthèse des données hydrogéologiques

De la même manière que pour les eaux superficielles, une synthèse des données hydrogéologiques disponibles sur le département des Landes a été réalisée dans l'objectif de mettre en évidence un éventuel impact des facteurs climatiques sur les eaux souterraines.

Les données traitées correspondent aux mesures acquises par le Département des Landes sur son réseau de piézomètres (52 ouvrages suivis manuellement et 92 suivis en continu) (Illustration 27).

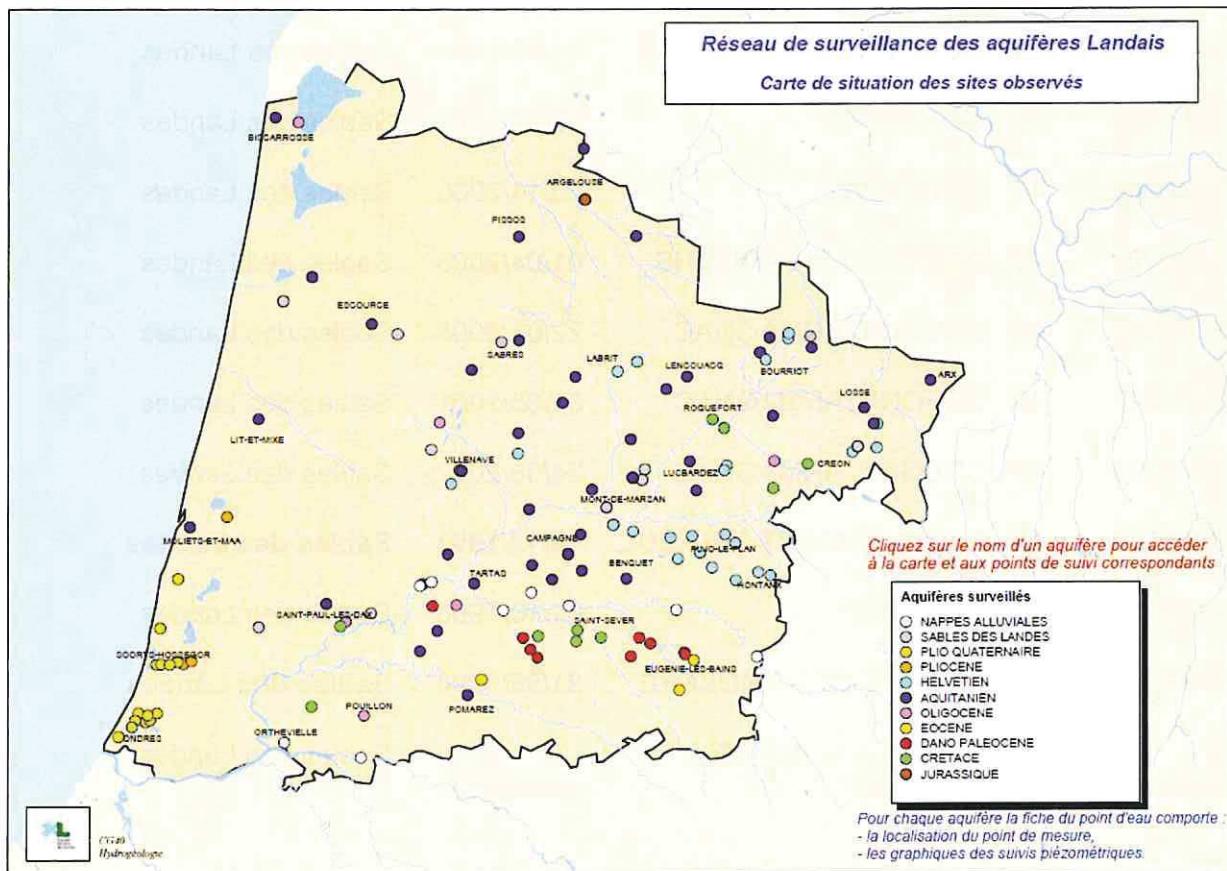


Illustration 27 : Réseau de surveillance piézométrique du Département des Landes d'après SIGES Aquitaine

Parmi les points suivis, 16 sont implantés dans la formation du Sable des Landes qui avec les formations alluviales et les autres formations plio-quaternaires constituent les aquifères les plus sensibles aux précipitations.

Les références BSS (Banque de données sur le Sous-Sol) de ces ouvrages ainsi que leurs communes d'implantation et les dates de début des suivis ont été précisés dans le tableau suivant (Illustration 28).

Les ouvrages suivis depuis plus de 20 ans sont repérés en gras. Ils constituent de ce fait, des ouvrages de référence.

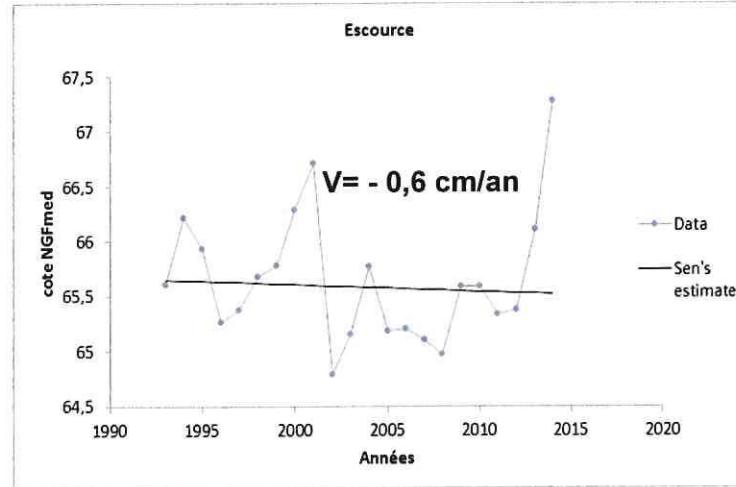
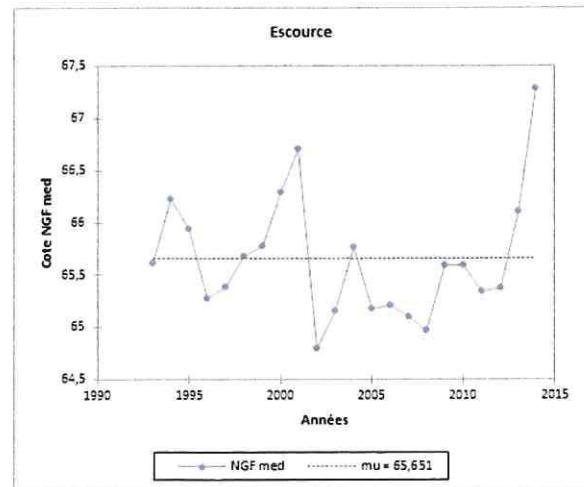
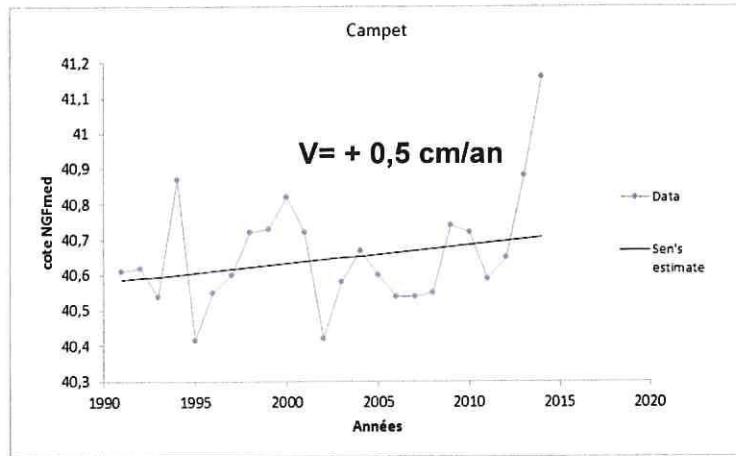
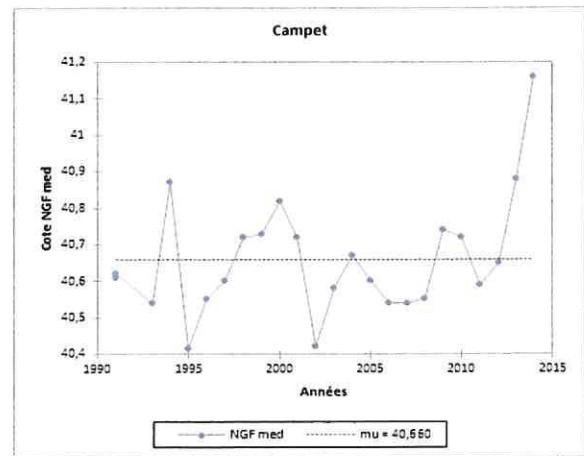
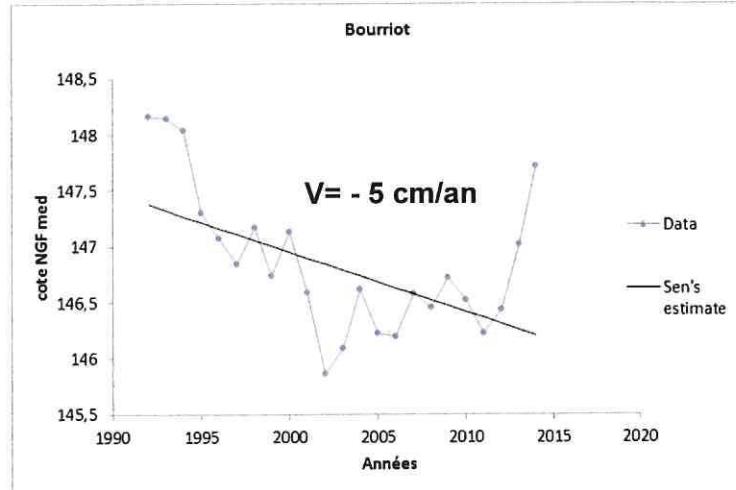
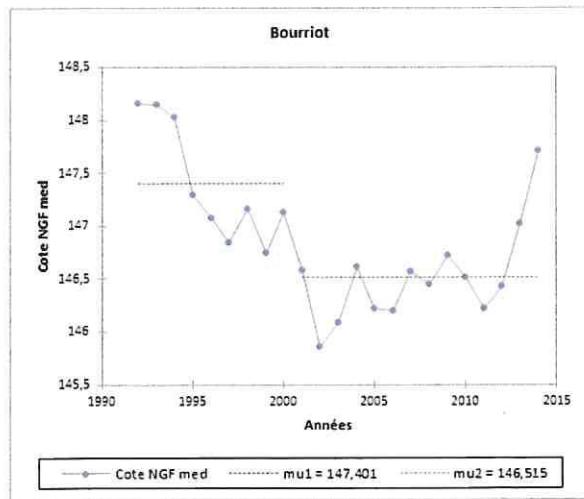
<u>BSS</u>	<u>Dépt</u>	<u>Commune</u>	<u>Début suivi</u>	<u>Aquifère</u>
08756X0033	40	ARGELOUSE	25/01/2001	Sables des Landes
08977X0036	40	MIMIZAN	10/03/2001	Sables des Landes
08986X0052	40	ESCOURSE	11/06/1992	Sables des Landes
08988X0014	40	SABRES	19/10/1990	Sables des Landes
09007X0047	40	BOURRIOT-BERGONCE	01/10/1992	Sables des Landes
09246X0098	40	MORCENX	01/05/1998	Sables des Landes
09257X0042	40	SAINT-AVIT	07/07/2005	Sables des Landes
09257X0043	40	SAINT-AVIT	29/11/2000	Sables des Landes
09257X0097	40	UCHACQ-ET-PARENTIS	01/04/2005	Sables des Landes
09267I0001	40	CREON-D'ARMAGNAC	22/04/2008	Sables des Landes
09268X0217	40	CREON-D'ARMAGNAC	01/05/2001	Sables des Landes
09268X0299	40	CREON-D'ARMAGNAC	24/08/2012	Sables des Landes
09505X0033	40	SAINT-VINCENT-DE-PAUL	15/12/1993	Sables des Landes
09511X0070	40	MEILHAN	01/10/1995	Sables des Landes
09512X0088	40	CAMPET-ET-LAMOLERE	21/05/1990	Sables des Landes
		SAINT-GEOURS-DE-		Sables des Landes
09763X0267	40	MAREMNE	09/08/2006	

Illustration 28 : Ouvrages implantés dans la formation du Sable des Landes d'après Département des Landes

De même que pour le traitement des données climatiques et hydrologiques, des tests statistiques ont été menés sur les séries de données piézométriques relatives à ces ouvrages.

Afin de s'affranchir des valeurs extrêmes, les tests ont été menés sur des cotes médianes annuelles (Illustration 29).

Les tests de Pettitt n'ont pas mis en évidence de rupture à l'exception d'un seuil correspondant à l'année 2000 sur le piézomètre de Bourriot, implanté dans un contexte agricole où la sollicitation de la nappe est importante. Cette rupture pourrait traduire une sensibilité particulière aux précipitations qui ont vu leur cumul diminuer à partir de cette même année (cf. chapitre 2.2) ou un changement de pratiques dans l'environnement immédiat du point d'eau (recours plus important aux eaux souterraines pour l'irrigation par exemple).



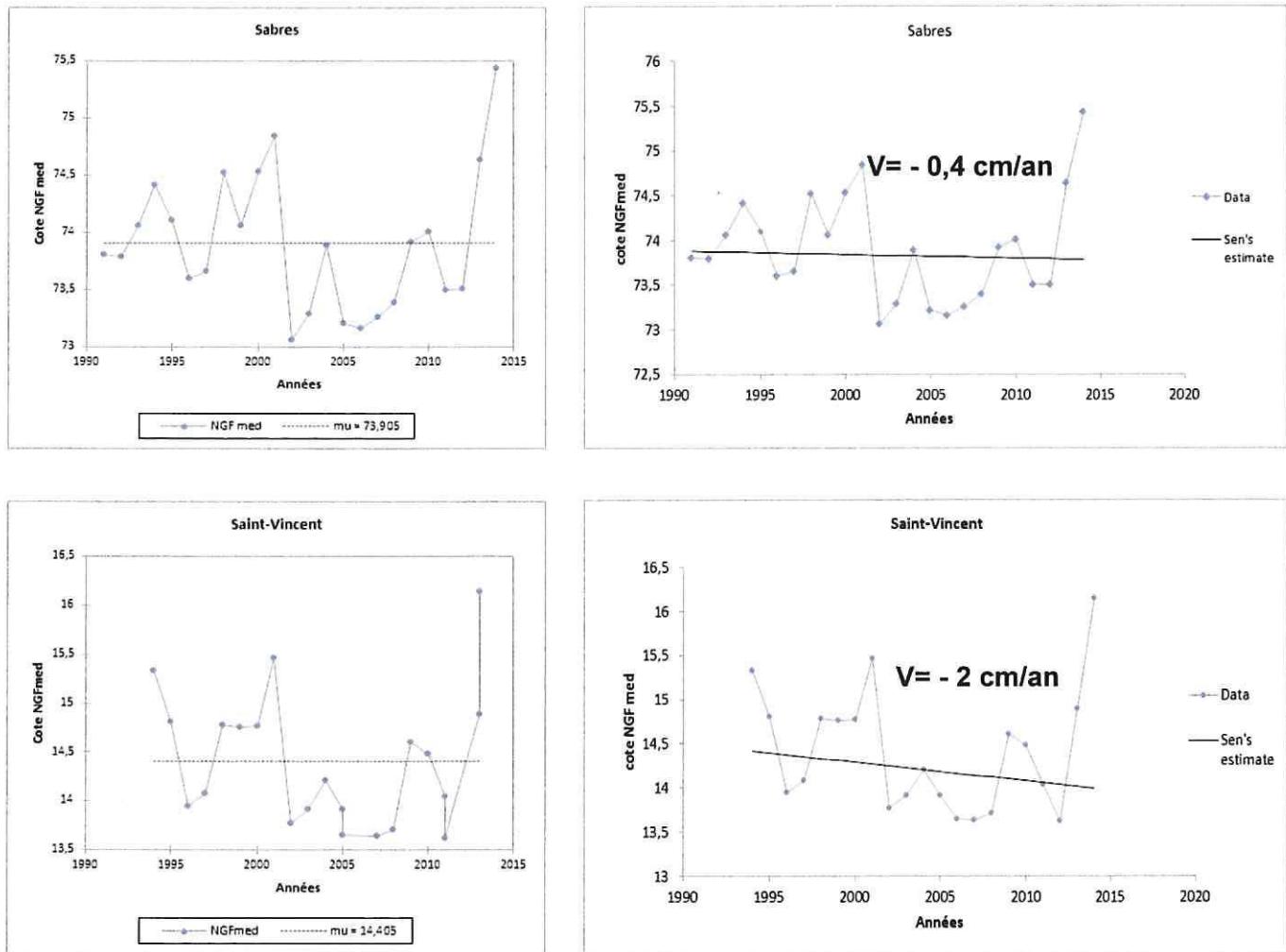


Illustration 29 : Tests statistiques (Pettitt, Man-Kendall et Le Sen) appliqués aux cotes piézométriques des 5 ouvrages de référence

Par ailleurs, les tests de Mann-Kendall et Le Sen ont permis d'évaluer des tendances sur les différentes séries :

- tendances à la hausse sur le piézomètre de Campet (+ 0,5 cm/an),
- tendances à la baisse sur les 4 autres piézomètres (de - 0,4 à - 5 cm/an).

Afin de mieux visualiser les secteurs concernés, ces tendances ont été reportées sur l'illustration 30.

De façon générale il semblerait donc que les niveaux piézométriques aient légèrement diminué au droit du département des Landes lors des 20 à 25 dernières années.

Ce phénomène est probablement lié à la diminution des précipitations et pourrait avoir engendré la disparition de certaines lagunes peu profondes en lien direct avec les eaux souterraines.

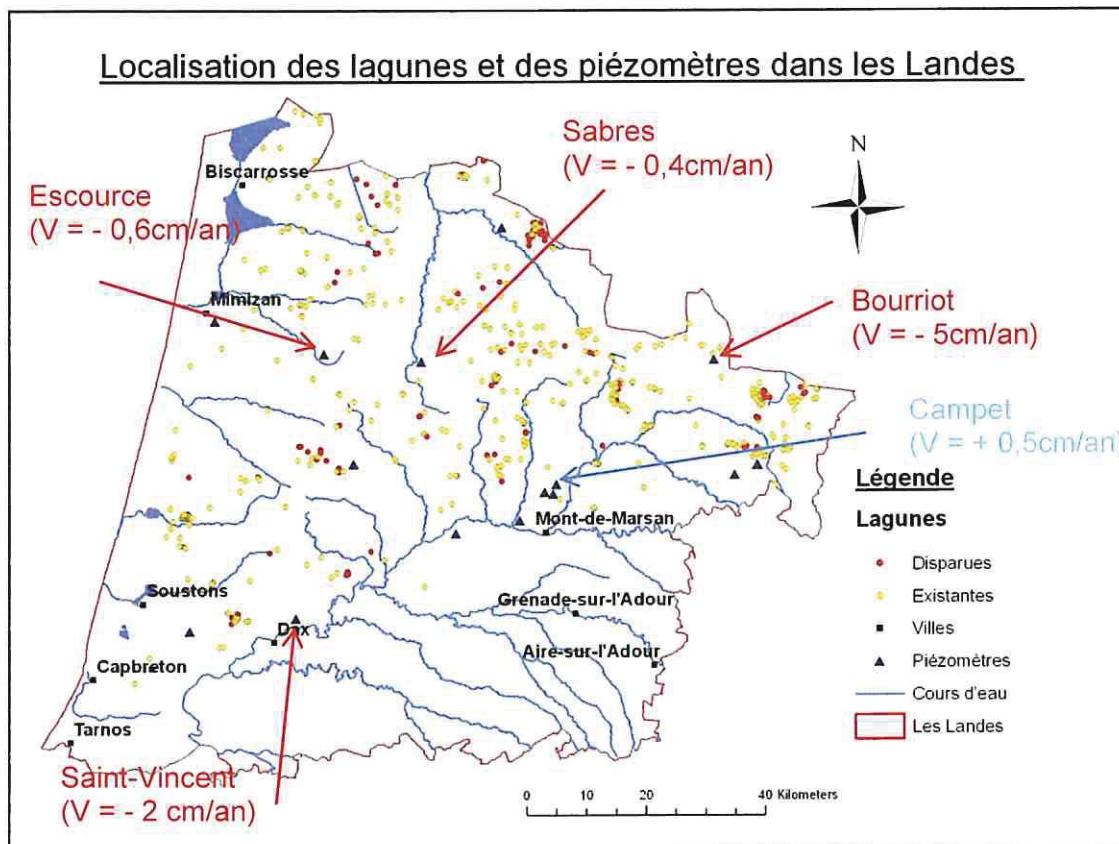


Illustration 30 : Synthèse des variations mises en évidence par les tests statistiques sur les 20 à 25 dernières années

En ce qui concerne les paramètres hydrodynamiques destinés à être injectés dans le logiciel CONNEXMIN pour déterminer la zone d'influence des lagunes (cf. contenu du volet 3 décrit en page 12 du présent document), un inventaire réalisé dans le cadre du module 6 de la convention régionale « Eaux souterraines » (partenariat BRGM/Région Aquitaine/Etat) a permis de montrer qu'aucun couple de données (T et S) n'était disponible sur le territoire du SAGE Midouze (cf. pages 59 et 60 du rapport BRGM/RP-63168-FR).

Des essais réalisés dans le cadre du même module en 2010 à Lugos, Biscarrosse, Ychoux, Mimizan et Solférino sur le territoire du SAGE Born-et-Buch ont quant à eux mis en évidence :

- des transmissivités comprises entre 7.10^{-3} et 2.10^{-2} m²/s
- des coefficients d'emmagasinement compris entre 6.10^{-3} et 2.10^{-2}

L'introduction de ces valeurs dans le logiciel pour une configuration de nappe infinie permet d'estimer entre 1 000 et 3 000 m la distance à laquelle un pompage en nappe mené pendant 90 jours consécutifs sollicite au moins 50 % d'eau de la lagune, la plus petite distance étant obtenue avec la plus faible transmissivité et le plus fort emmagasinement et la plus grande, avec la plus forte transmissivité et le plus faible emmagasinement.

Ces distances sont comprises entre 200 et 700 m pour des temps de pompage de 5 jours et entre 100 et 500 m pour une durée de pompage de 24 heures.

Pour cette dernière durée de pompage (1 jour) et pour le couple de paramètres hydrodynamiques le plus favorable, le pourcentage d'eau soutiré à la lagune n'est plus que de 10 % à une distance de 300 m.

Ces distances restent indicatives. En fait, seule la réalisation d'une campagne de pompages d'essai de longue durée (12 h environ) sur 3 sites différents dans l'environnement d'une lagune peut permettre d'accéder aux valeurs de T et S et de déterminer avec précision la distance d'impact d'un pompage vis-à-vis de la zone humide.

5. Contexte physique et localisation des lagunes par rapport aux bassins versants

Dans le cadre de la caractérisation des lagunes landaises et de l'identification des causes de leur disparition, une série de paramètres a été analysée dont le contexte physique des lagunes (altitudes et pentes) et leur localisation par rapport aux bassins versants.

5.1. CONTEXTE PHYSIQUE

5.1.1. Altitudes

L'Illustration 31 a été établie sur la base d'un fichier fourni par le Département des Landes précisant les coordonnées des lagunes ainsi que leur état. Elle représente leur localisation sur un fond qui correspond au MNT au pas de 25 m (modèle numérique de terrain).

Au droit des Landes, l'altitude varie de 0 à 293 m et toutes les lagunes (à l'exception d'une seule) se situent au nord de l'Adour avec une densité plus importante à l'est qu'à l'ouest du département.

La répartition des altitudes des centroïdes des lagunes a été étudiée sous la forme de 2 histogrammes, le premier représentant la totalité des lagunes et le second faisant la distinction entre lagunes existantes et lagunes disparues (Illustration 32). L'Illustration 33 correspond aux données numériques et permet d'accéder aux différents pourcentages calculés.

Les 2 classes les mieux représentées sont les tranches 60-70 et 70-80 m, vient ensuite la classe 100-110 m. En fait, 68 % des 557 lagunes recensées présentent une altitude supérieure à 60 mètres.

En ce qui concerne la distinction entre lagunes existantes et lagunes disparues, les 29 lagunes disparues dans la tranche d'altitude 70-80 m représentent 40% du nombre total de sites recensés dans cette tranche d'altitude (72) et 26 % de toutes les lagunes disparues (112). Il s'agit de la classe présentant le plus fort taux de disparition.

Si l'on exclut la tranche 70-80 m, le taux de disparition des lagunes varie entre 0 et 36 % en fonction de la classe et concerne la quasi-totalité des tranches d'altitudes.

Cette observation laisse supposer que l'altitude n'est pas un facteur qui conditionne le maintien ou la disparition des lagunes.

5.1.2. Pentes

Le même type d'approche a été mené en ce qui concerne la pente moyenne observée dans un rayon de 50 m autour des lagunes (Illustration 34, Illustration 35, Illustration 36).

Il apparaît que 91 % des lagunes présentent une pente moyenne inférieure à 1% et se situent donc dans un environnement relativement plat.

Le taux de disparition par classe est, quant à lui, compris entre 19 et 25 % si l'on exclut les valeurs 0 et 50 relatives aux tranches 4-4,5 (1 lagune recensée) et 2-2,5 (6 lagunes recensées).

De même que l'altitude des lagunes, le facteur « pente moyenne dans un rayon de 50 m » ne semble pas conditionner leur maintien ou leur disparition.

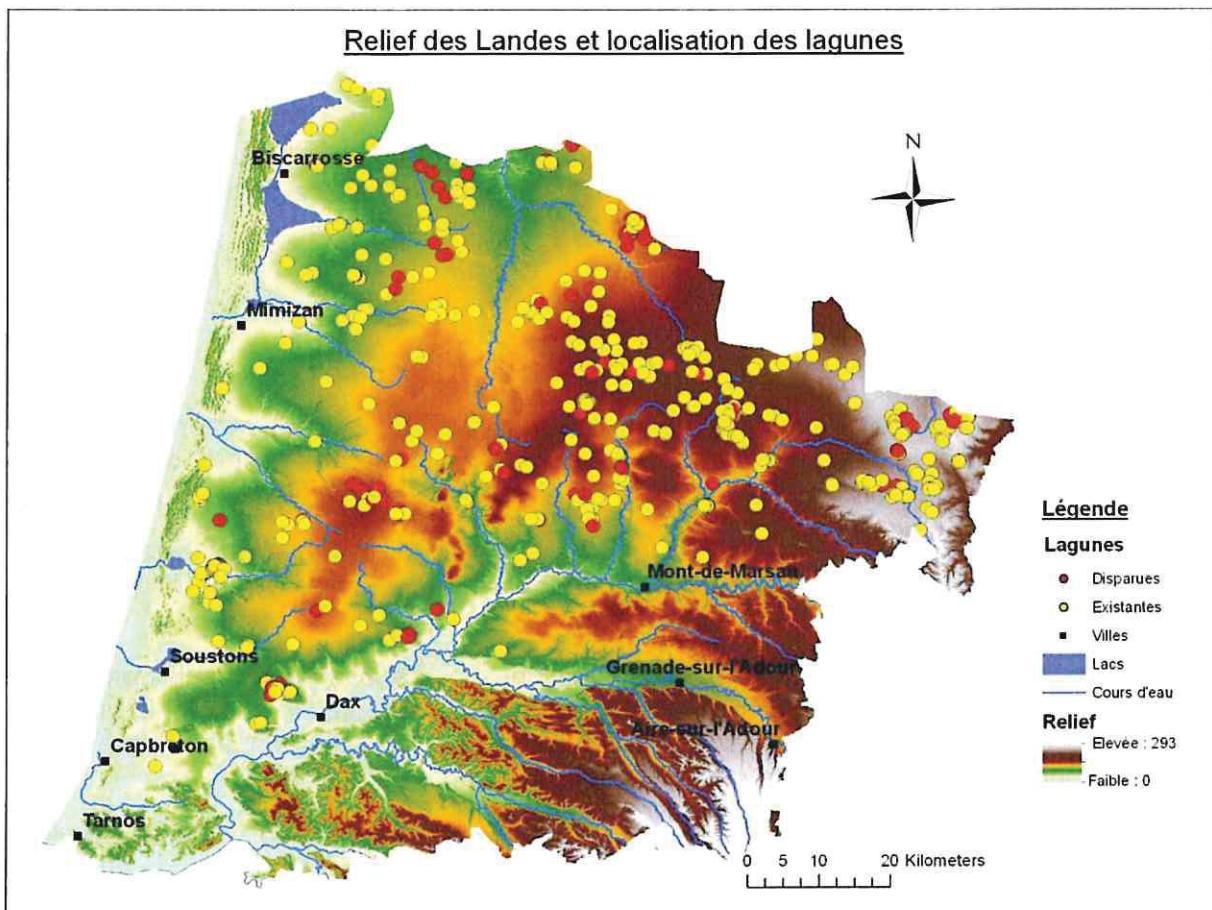


Illustration 31 : Localisation des lagunes et MNT

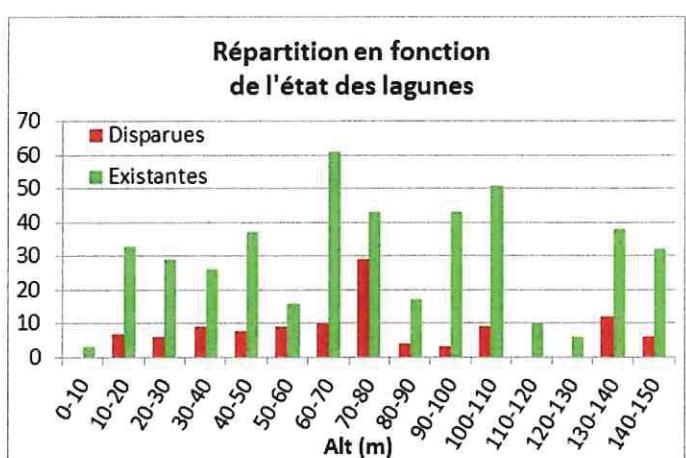
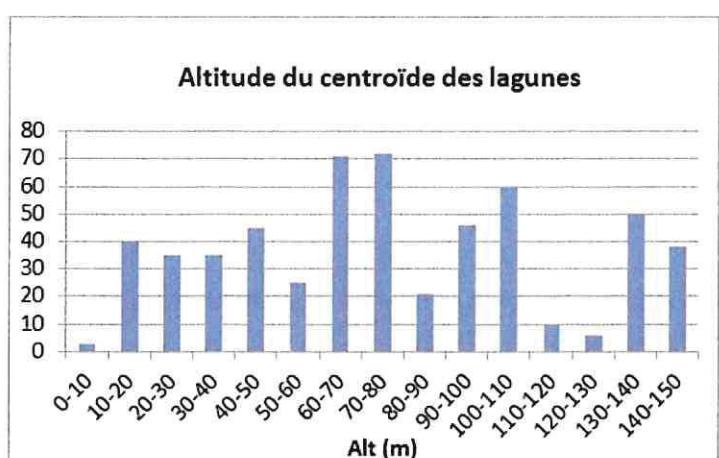


Illustration 32 : Altitude du centroïde des lagunes et répartition en fonction de leur état

Classes altitudes (m)	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité de la classe d'altitudes (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
0-10		3	3	1	0	0
10-20	7	33	40	7	6	18
20-30	6	29	35	6	5	17
30-40	9	26	35	6	8	26
40-50	8	37	45	8	7	18
50-60	9	16	25	4	8	36
60-70	10	61	71	13	9	14
70-80	29	43	72	13	26	40
80-90	4	17	21	4	4	19
90-100	3	43	46	8	3	7
100-110	9	51	60	11	8	15
110-120	0	10	10	2	0	0
120-130	0	6	6	1	0	0
130-140	12	38	50	9	11	24
140-150	6	32	38	7	5	16
Total général	112	445	557			

Illustration 33 : Détails de la répartition des centroïdes des lagunes

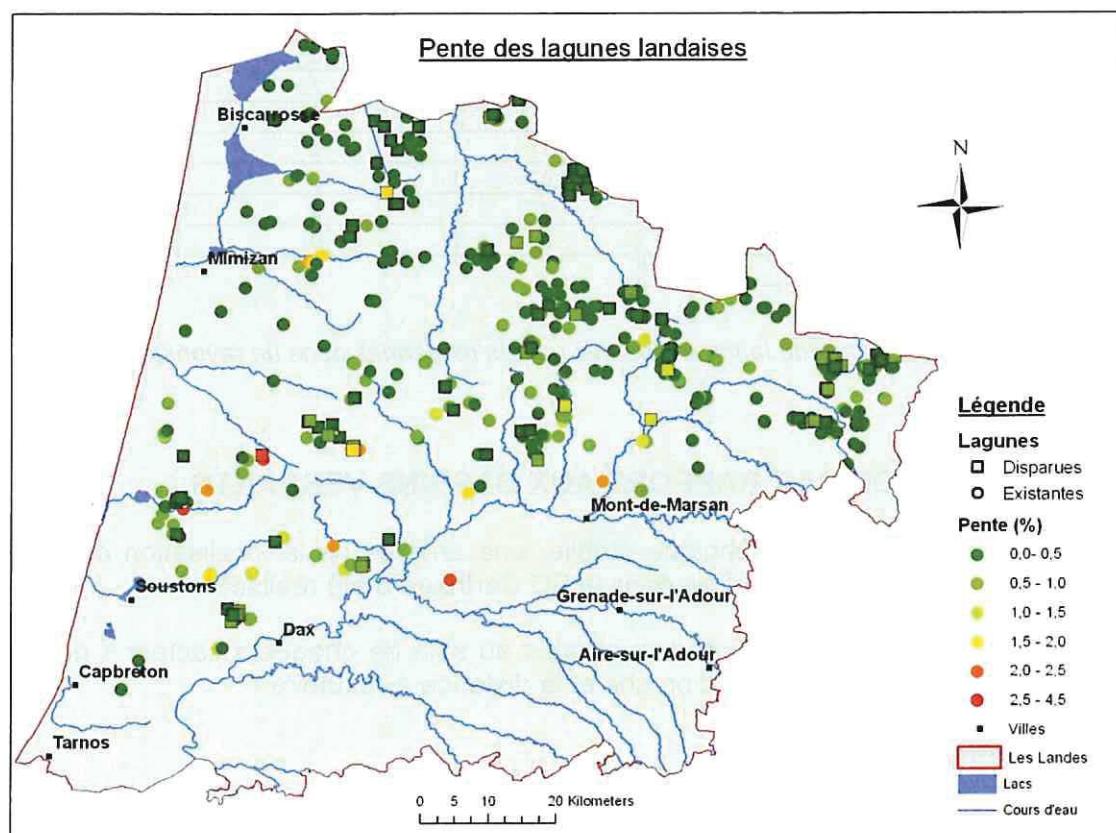


Illustration 34 : Pentes moyennes dans un rayon de 50 m autour des lagunes

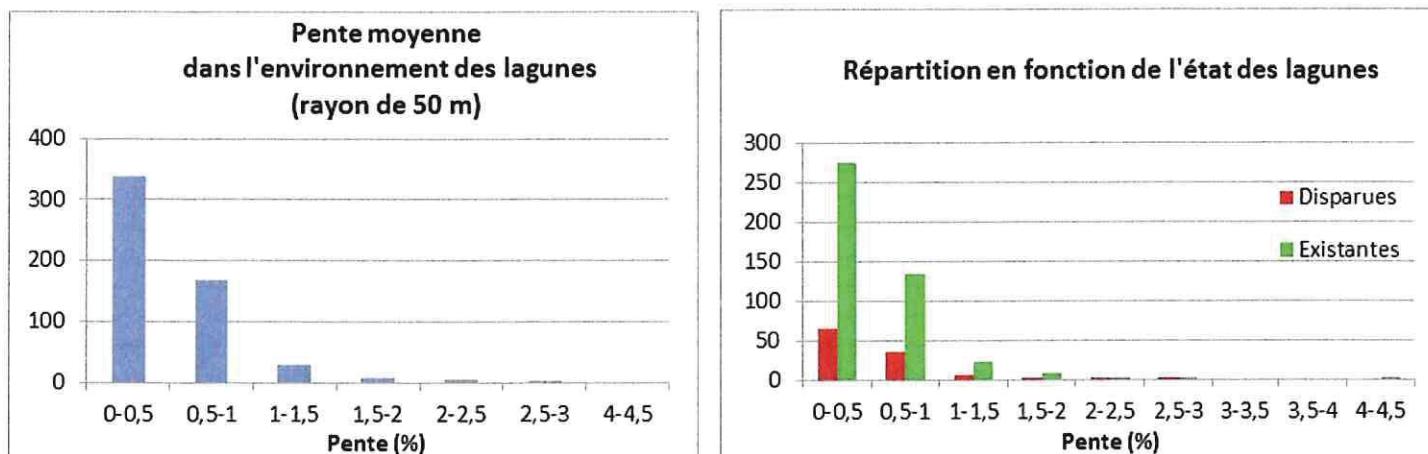


Illustration 35 : Pentes moyennes dans un rayon de 50 m et répartition en fonction des lagunes

Classes des pentes (%)	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité de la classe d'altitudes (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
0-0,5	65	274	339	61	58	19
0,5-1	35	134	169	30	31	21
1-1,5	6	23	29	5	5	21
1,5-2	2	7	9	2	2	22
2-2,5	3	3	6	1	3	50
2,5-3	1	3	4	1	1	25
3-3,5	0	0	0	0	0	
3,5-4	0	0	0	0	0	
4-4,5	0	1	1	0	0	0
Total général	112	445	557			

Illustration 36 : Détails de la répartition des pentes moyennes dans un rayon de 50 m

5.2. LOCALISATION PAR RAPPORT AUX BASSINS VERSANTS

Conformément à la proposition technique établie, une analyse de la localisation des lagunes par rapport aux bassins versants définis dans la BD Carthage a été réalisée.

Elle a consisté à étudier la répartition des lagunes au sein de chaque « secteur » ou « sous-secteur », la distance à la crête la plus proche et la distance à l'exutoire.

5.2.1. Répartition générale

L'Illustration 37 représente la localisation des lagunes (existantes ou disparues) par rapport aux secteurs ou sous-secteurs définis dans la BD Carthage.

Le niveau de découpage retenu correspond aux « secteurs » sur la majeure partie du territoire (ex : Midouze, Leyre...) et aux « sous-secteurs » pour la partie sud-ouest de façon à prendre en compte les courants de Contis, d'Huchet, de Soustons et le Boudigau.

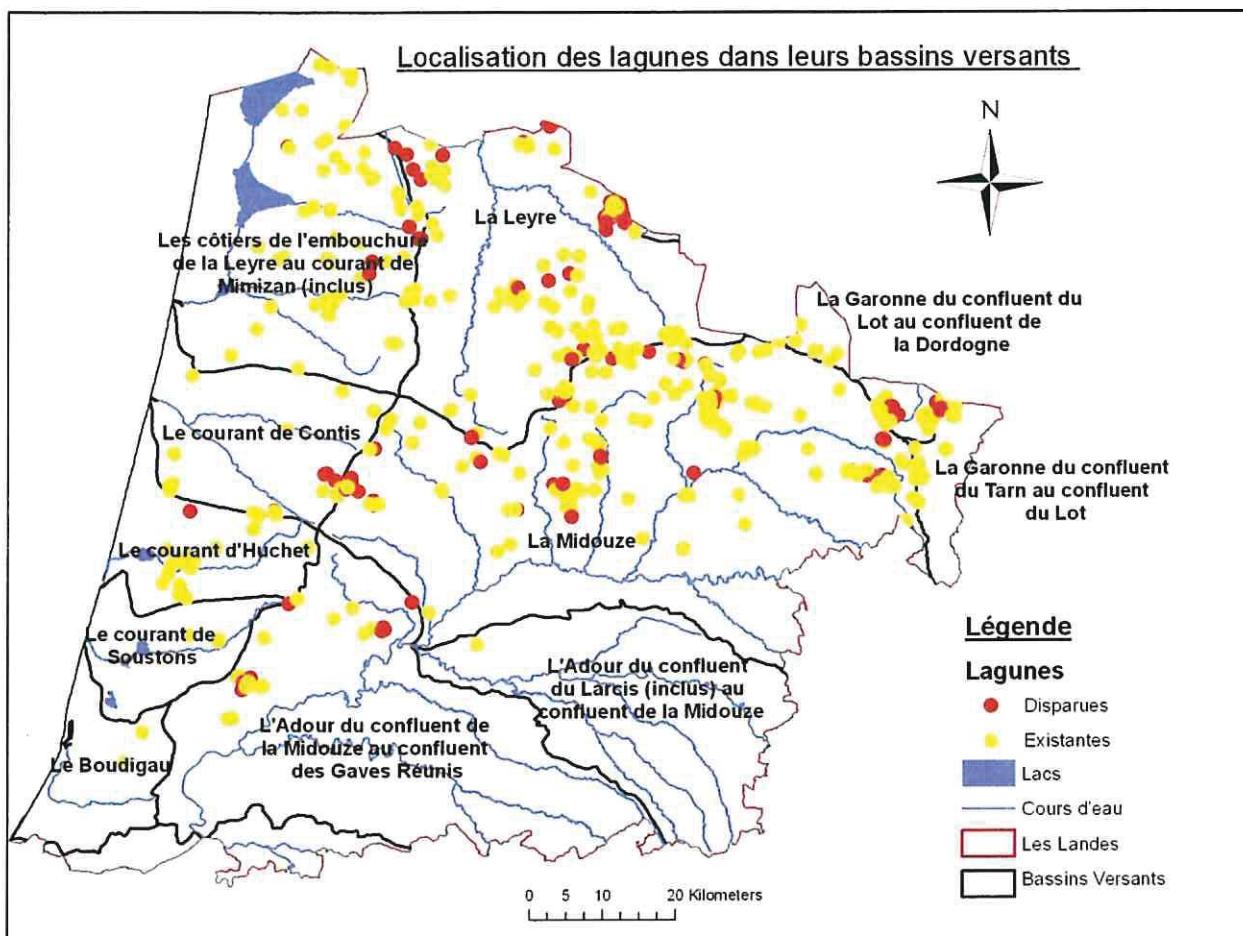


Illustration 37 : Localisation des lagunes par rapport aux bassins versants

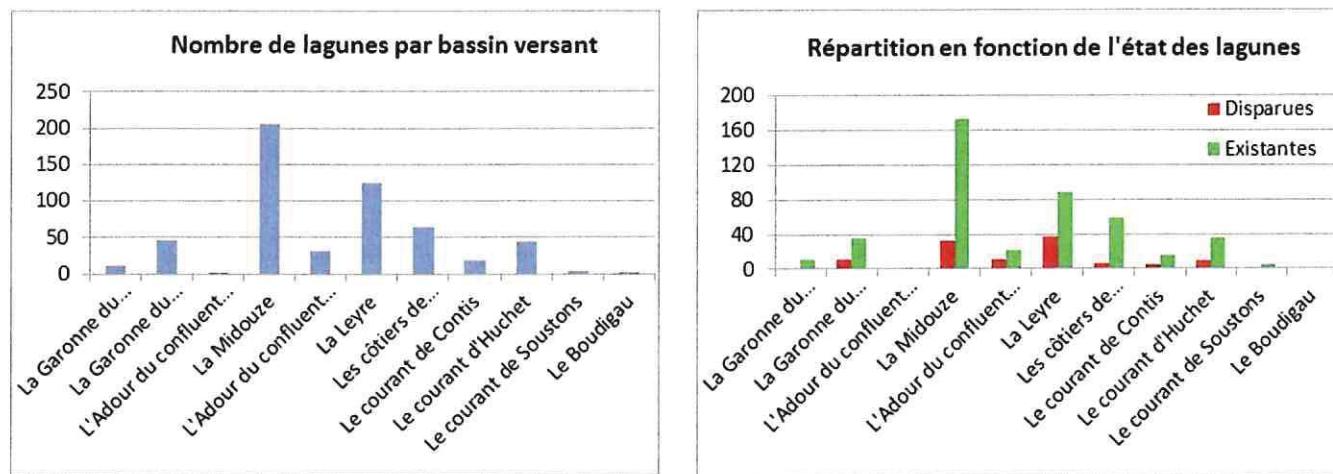


Illustration 38 : Nombre de lagunes par bassin versant et répartition en fonction de leur état

Bassins Versants	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité du bassin versant (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
La Garonne du confluent du Tarn au confluent du Lot	1	11	12	2	1	8
La Garonne du confluent du Lot au confluent de la Dordogne	10	36	46	8	9	22
L'Adour du confluent du Larcis (inclus) au confluent de la Midouze	0	1	1	0	0	0
La Midouze	33	173	206	37	29	16
L'Adour du confluent de la Midouze au confluent des Gaves Réunis	11	21	32	6	10	34
La Leyre	37	88	125	22	33	30
Les côtiers de l'embouchure de la Leyre au courant de Mimizan (inclus)	6	59	65	12	5	9
Le courant de Contis	4	15	19	3	4	21
Le courant d'Huchet	9	35	44	8	8	20
Le courant de Soustons	1	4	5	1	1	20
Le Boudigau	0	2	2	0	0	0
Total général	112	445	557			

Illustration 39 : Détails de la répartition des lagunes par rapport aux bassins versants

L'Illustration 38 et l'Illustration 39 montrent que 59 % des lagunes se situent au droit des bassins versants de la Leyre et de la Midouze. 24 % des lagunes se situent, quant à elles, au droit de la bordure océanique.

Les taux de disparition varient entre 0 et 34 % en fonction du bassin versant considéré avec les plus forts taux observés sur l'Adour du confluent de la Midouze au confluent des Gaves réunis (34 %) et sur la Leyre (30 %). Si on exclut les 2 classes présentant des taux de disparition nuls (qui regroupent un maximum de 2 lagunes), les taux varient de 8 à 34 %.

L'appartenance à des entités de type « secteur » ou « sous-secteur » ne semble donc pas conditionner l'existence ou la disparition des lagunes, ce qui est confirmé par la présence de lagunes existantes et disparues au sein de mêmes zones (Illustration 37).

5.2.2. Distance à la crête la plus proche

En complément de la position des lagunes par rapport aux différents bassins versants, la distance des lagunes à la crête topographique la plus proche (représentant la limite du bassin versant) a été étudiée et cartographiée (Illustration 40).

38 % des lagunes se situent à moins de 2 500 m de la crête la plus proche et 53 %, à moins de 5 000 m, ce qui confirme que la majorité des lagunes se situent dans des zones d'altitudes élevées.

En ce qui concerne les taux de disparition, si l'on exclut les 2 dernières classes de distances qui regroupent des échantillons peu représentatifs (12 lagunes au total), les valeurs s'échelonnent entre 5 et 27 %, ce qui est assez homogène.

Le facteur « distance à la crête la plus proche » ne semble donc pas être discriminant sur le maintien ou la disparition des lagunes.

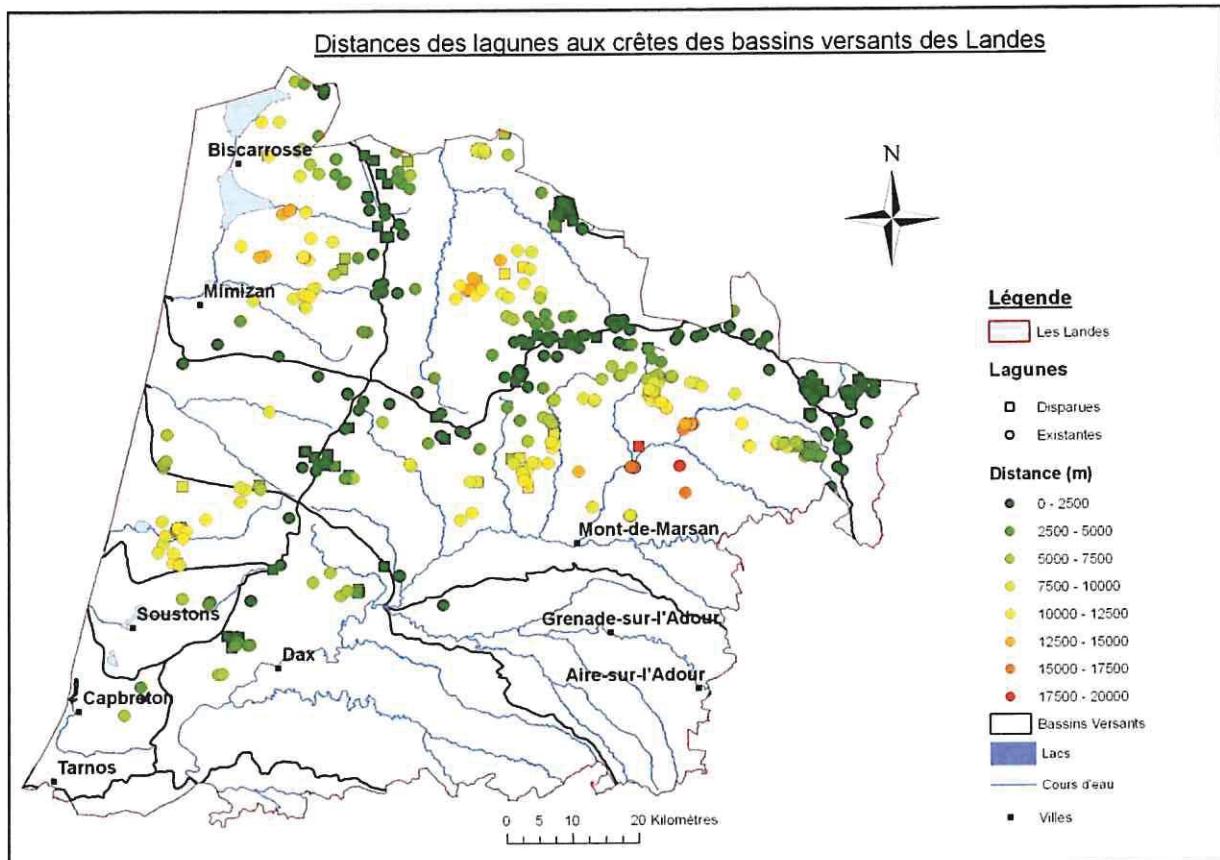


Illustration 40 : Distances à la crête la plus proche

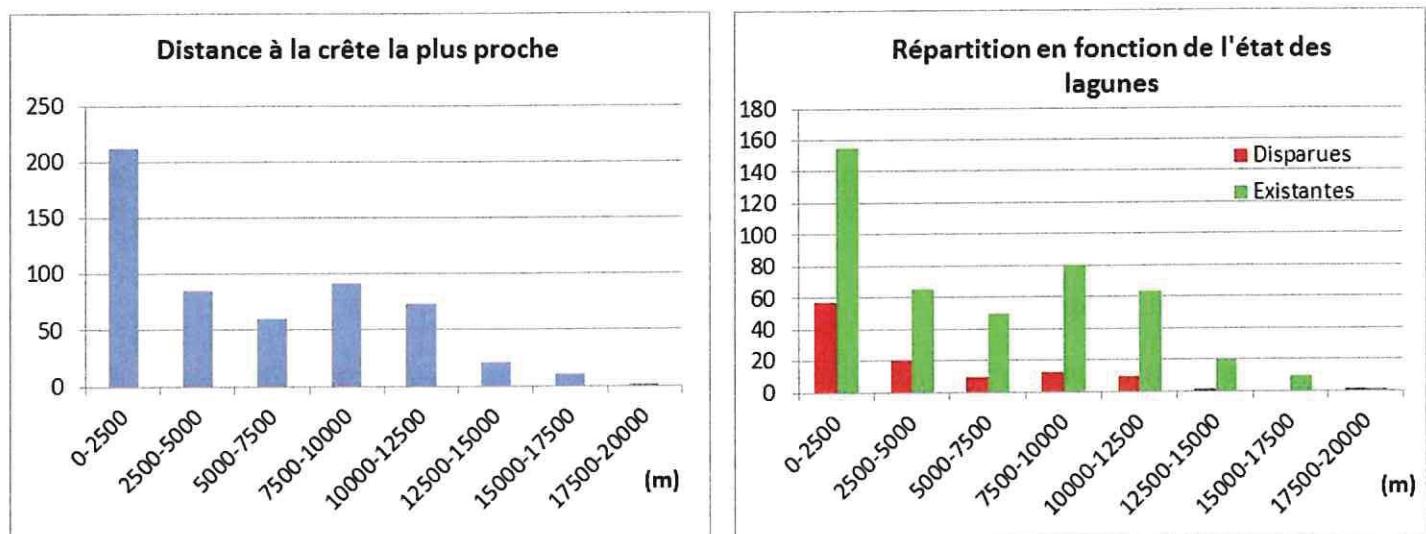


Illustration 41 : Distance à la crête la plus proche et répartition en fonction de l'état des lagunes

Distance lagunes/crêtes (m)	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité de la classe de distances (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
0-2500	57	155	212	38	51	27
2500-5000	20	65	85	15	18	24
5000-7500	10	50	60	11	9	17
7500-10000	12	80	92	17	11	13
10000-12500	10	64	74	13	9	14
12500-15000	1	20	21	4	1	5
15000-17500		10	10	2	0	0
17500-20000	1	1	2	0	1	50
Total général	111	445	556			

Illustration 42 : Détails sur les distances à la crête la plus proche

5.2.3. Distance à l'exutoire

Pour terminer l'examen de la position des lagunes par rapport aux bassins versants, les distances entre les lagunes et les exutoires des entités hydrologiques sur lesquelles elles se trouvent ont été analysées.

Dans la mesure où les bassins versants pris en compte présentent des tailles différentes, les distances entre lagunes et exutoires ont été normées en les divisant par la distance entre l'exutoire et le point le plus éloigné du bassin versant (Illustration 43).

L'Illustration 44 et l'Illustration 45 montrent que la répartition des lagunes est assez homogène. On note toutefois que très peu de lagunes se situent à proximité des exutoires (2 premières classes peu représentées) et que 62 % présentent un rapport entre distances supérieur à 0,5, indiquant une position plutôt amont ou médiane au sein du bassin versant.

En ce qui concerne le pourcentage de lagunes disparues au sein de chaque classe, à l'exception des 2 premières classes non représentatives du fait du faible nombre de lagunes concernées, les taux sont assez homogènes (7 à 31 %).

La position des lagunes vis-à-vis des exutoires n'influencerait donc pas leur évolution.

5.3. BILAN

Parmi les facteurs examinés dans ce chapitre (altitude du centroïde des lagunes, pente moyenne dans un rayon de 50 m, localisation par rapport au bassin versant, distance à la crête la plus proche et distance à l'exutoire), aucun ne semble conditionner le maintien ou la disparition des lagunes.

On retiendra aussi que :

- la plupart des lagunes (68 %) se situent dans des secteurs d'altitudes supérieures à 60 m,***
- la majorité des lagunes (91 %) se situent dans des environnements plats (pente < 1 %),***
- la plupart des lagunes (59 %) se situent au droit des bassins versants de la Leyre ou de la Midouze,***
- la plupart des lagunes (62 %) se situent en amont ou dans la zone médiane des bassins versants sur lesquels elles se trouvent (53 % d'entre elles se situent à moins de 5 km de la crête la plus proche).***

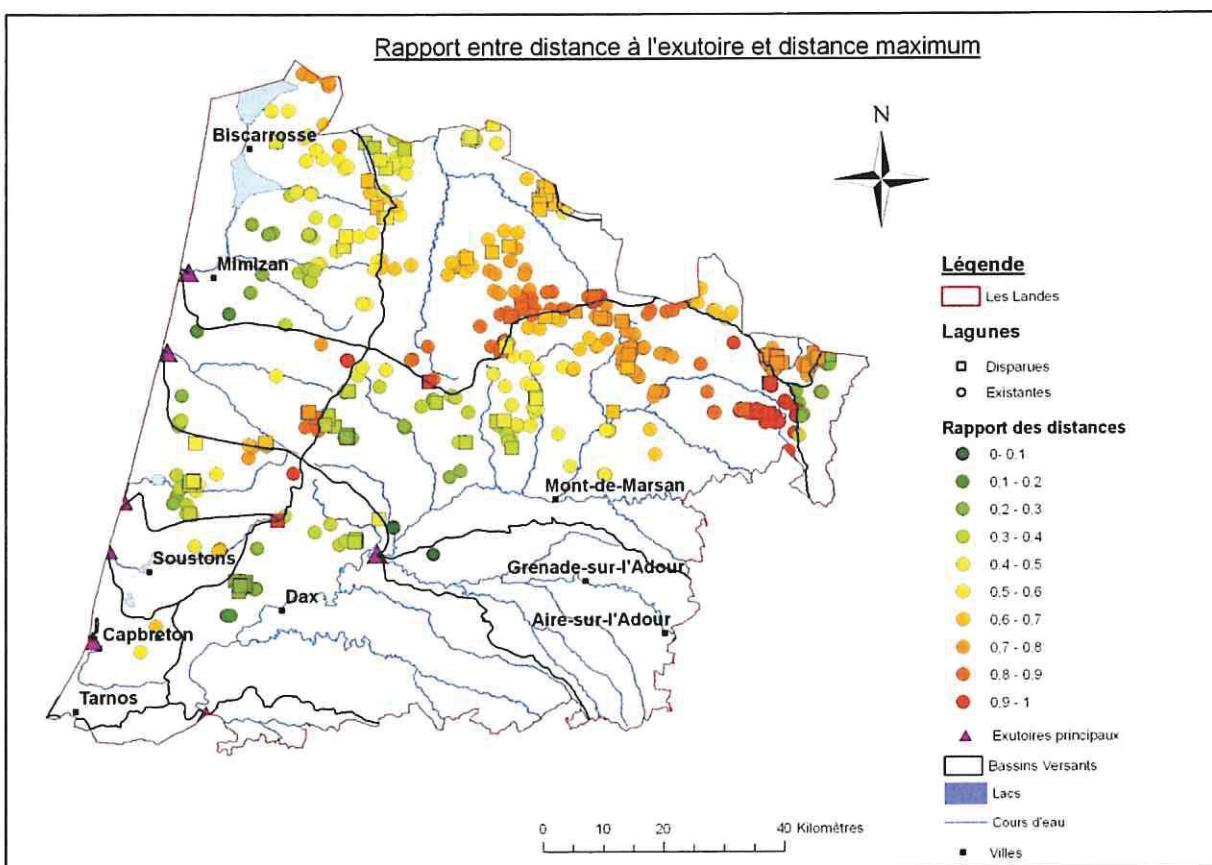


Illustration 43 : Rapport entre distance à l'exutoire et distance maximum

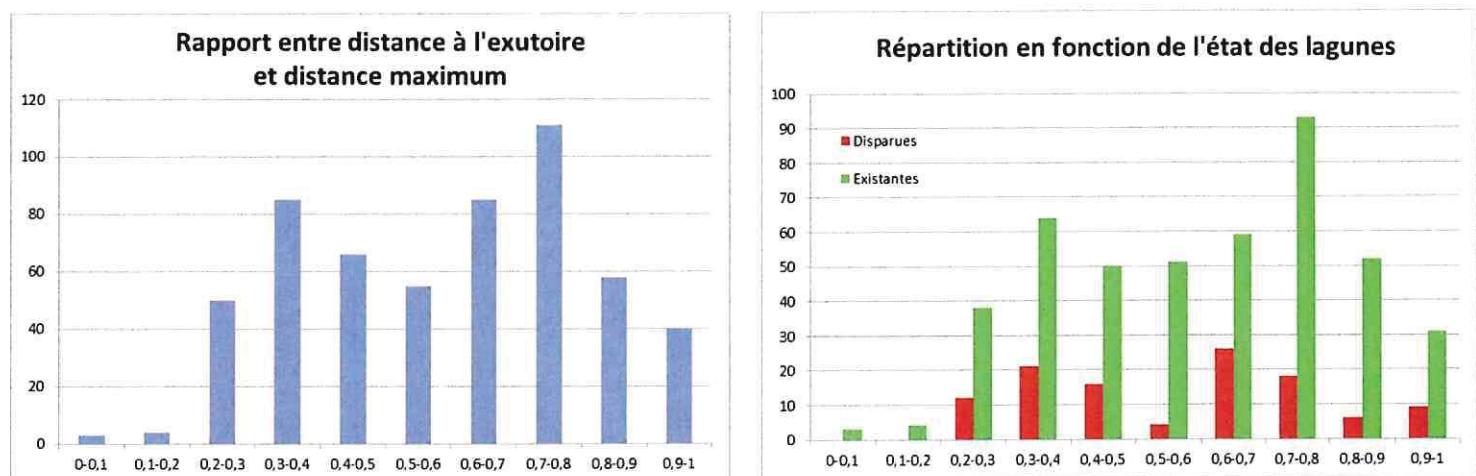


Illustration 44 : Rapport entre distance à l'exutoire et distance maximum et répartition en fonction de l'état des lagunes

Caractérisation des lagunes landaises

Classes de rapports	Position dans le bassin versant	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité de la classe de rapports (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes	% de lagunes disparues dans la classe
0-0,1	proche exutoire	0	3	3	1	0	0
0,1-0,2		0	4	4	1	0	0
0,2-0,3		12	38	50	9	11	24
0,3-0,4	médiane	21	64	85	15	19	25
0,4-0,5		16	50	66	12	14	24
0,5-0,6		4	51	55	10	4	7
0,6-0,7		26	59	85	15	23	31
0,7-0,8		18	93	111	20	16	16
0,8-0,9	tête	6	52	58	10	5	10
0,9-1		9	31	40	7	8	23
Total général		112	445	557			

Illustration 45 : Détails sur les rapports entre distance à l'exutoire et distance maximum

6. Contexte géologique

La géologie des formations mio-plio-quaternaires au droit des Landes de Gascogne et du Médoc est étudiée depuis 2008 dans le cadre du module 6 de la convention « Eaux souterraines » passée entre le BRGM, la Région Aquitaine et l'Etat.

Cette étude a déjà abouti à la rédaction de 5 rapports consultables et téléchargeables sur le site internet du BRGM (BRGM/RP-56475-FR, BRGM/RP-57813-FR, BRGM/RP-60259-FR, BRGM/RP-61303-FR et BRGM/RP-63168-FR) auxquels le lecteur pourra se référer.

De façon résumée, on retiendra que :

- dès le Miocène moyen, une régression marine a entraîné une sédimentation continentale au sein du delta landais. D'épaisses formations constituées de couches sablo-graveleuses alternant avec des assises argileuses se sont alors déposées (Illustration 46),
- ces formations constituent un vaste réservoir aquifère multicouches d'extension latérale complexe, au sein duquel les réservoirs sableux ou graveleux peuvent être, suivant les endroits, soit connectés, soit isolés par des niveaux argileux d'extension et d'épaisseur très variables (Illustration 47),
- les Glaises bigarrées représentent le seul niveau imperméable d'extension régionale. Les autres niveaux argileux susceptibles d'isoler localement les aquifères sont représentés par le toit argileux de la formation d'Arengosse, le toit argileux de la formation d'Onesse, les argiles de Brach (sommet de la formation de Belin) et les argiles d'Argelouse (sommet de la formation de Castets).

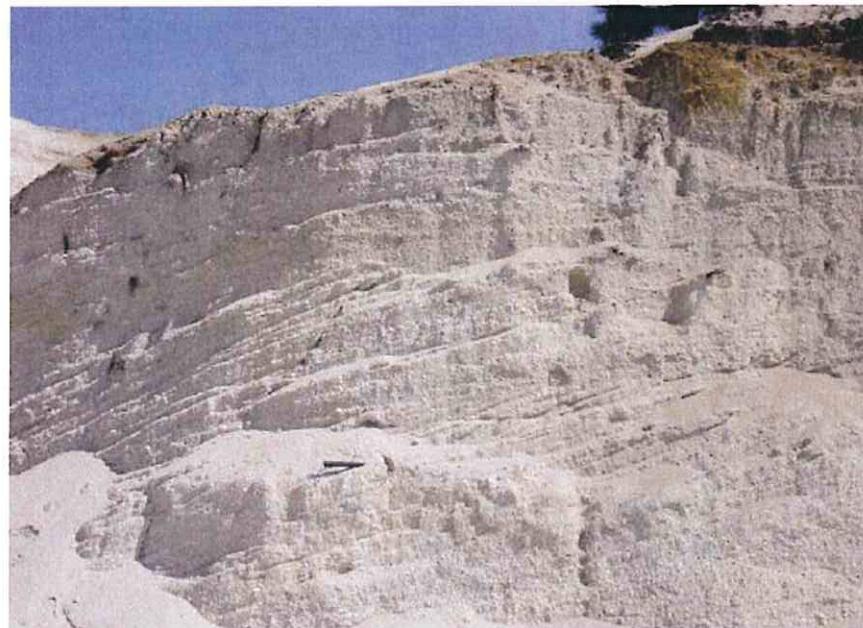


Illustration 46 : Exploitation des formations plio-quaternaires à Belin-Beliet (Formation de Belin) d'après SIGES Aquitaine

Caractérisation des lagunes landaises

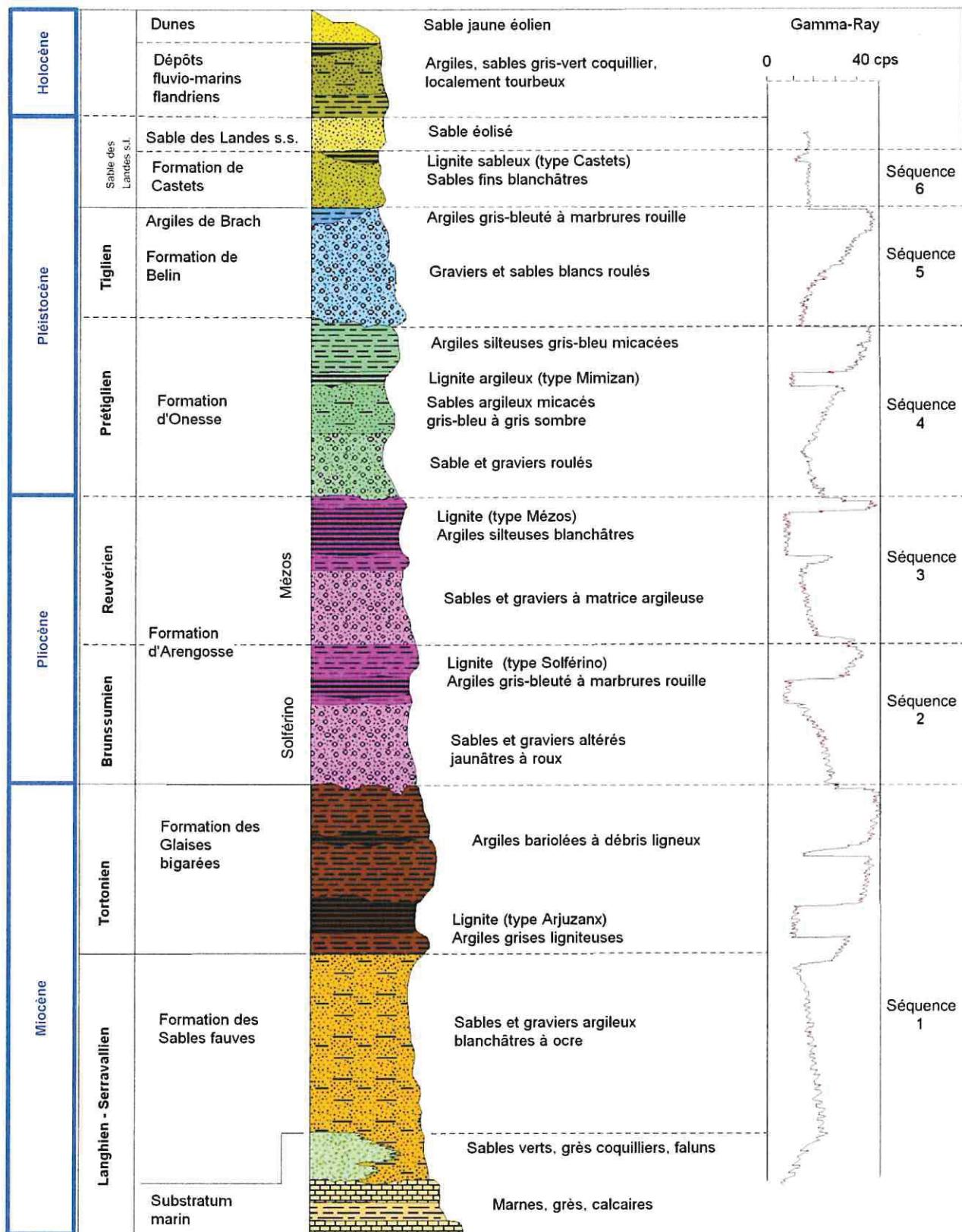


Illustration 47 : Log théorique des formations mio-plio-quaternaires (d'après Corbier et al, 2010)

Lors de la deuxième année de l'étude précédemment mentionnée, le BRGM a mis en place un modèle géologique « 10 couches » des formations plio-quaternaires permettant, entre autres, de tracer les isohypsies et les isopaques des différentes formations et de visualiser leur agencement au droit de n'importe quelle coupe.

Dans le cadre de la présente étude, le modèle a été utilisé pour mieux préciser l'agencement des formations au droit du département des Landes.

6.1. AGENCEMENT DES FORMATIONS AU DROIT DU DEPARTEMENT DES LANDES

L'agencement des formations mio-plio-quaternaires au droit du département des Landes a été précisé au moyen de 8 coupes : 4 coupes ouest/est dites de référence (établies au moment de la mise en place du modèle géologique, coupes 11 à 14 : Illustration 49) et 4 coupes complémentaires nord/sud (établies dans le cadre de la présente étude, coupes 1 à 4 : Illustration 50).

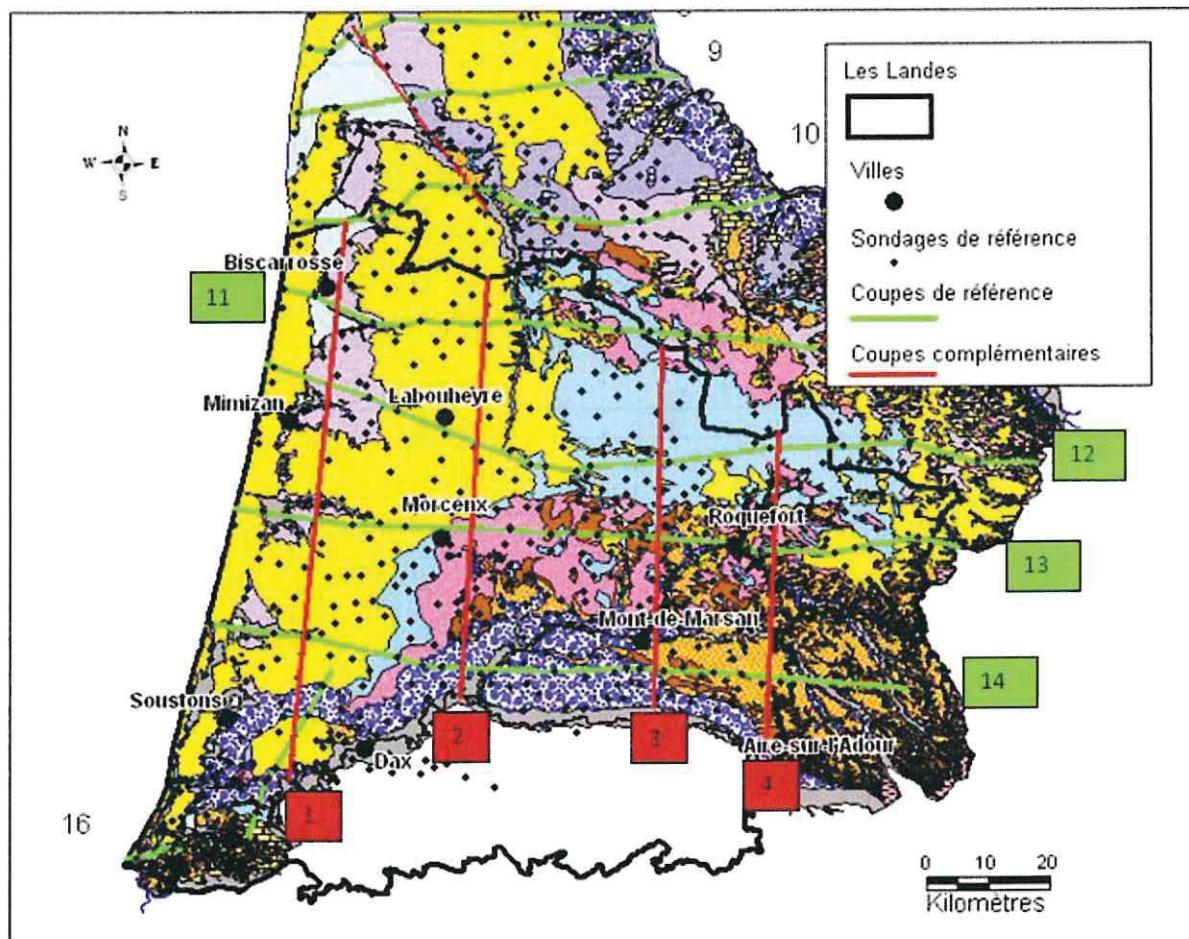


Illustration 48 : Tracé des coupes réalisées pour préciser l'agencement des formations mio-plio-quaternaires

Caractérisation des lagunes landaises

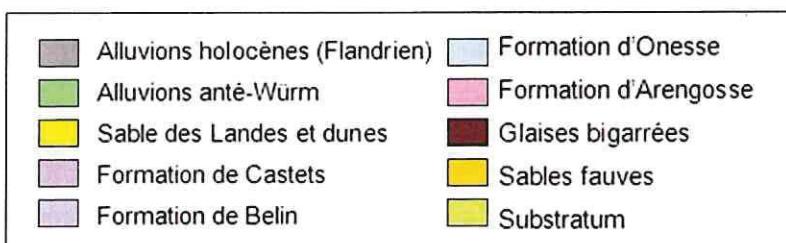
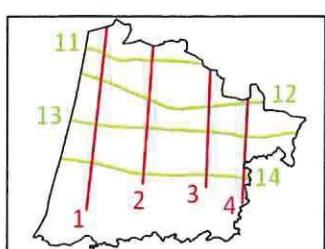
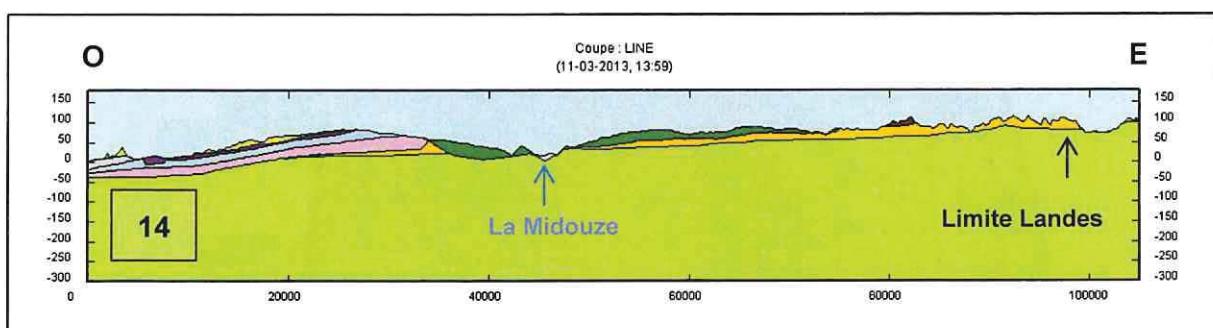
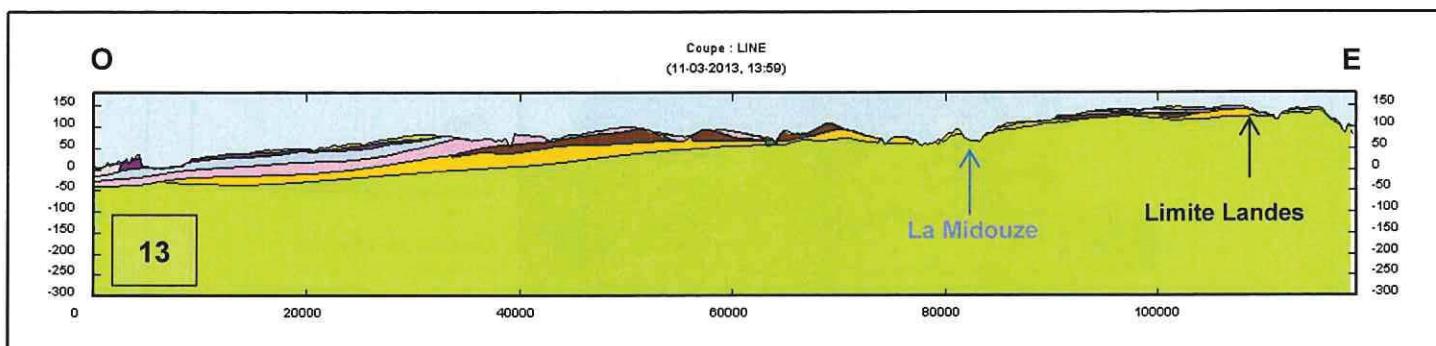
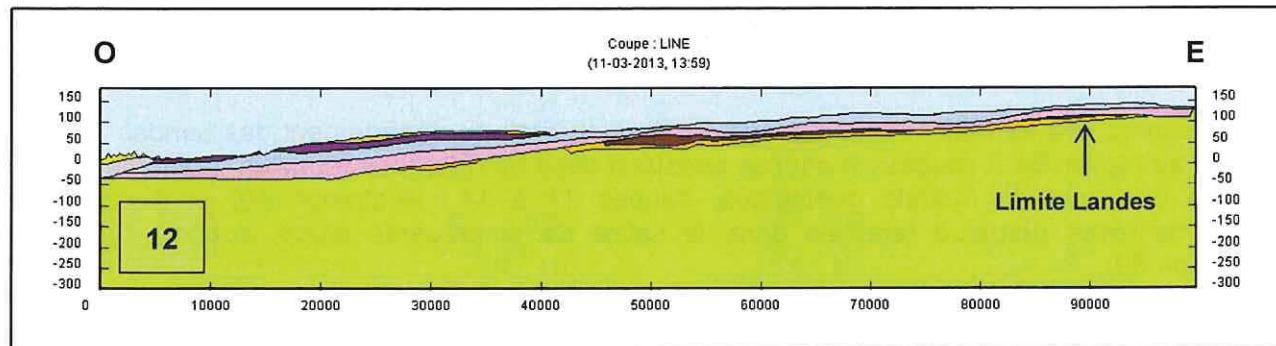
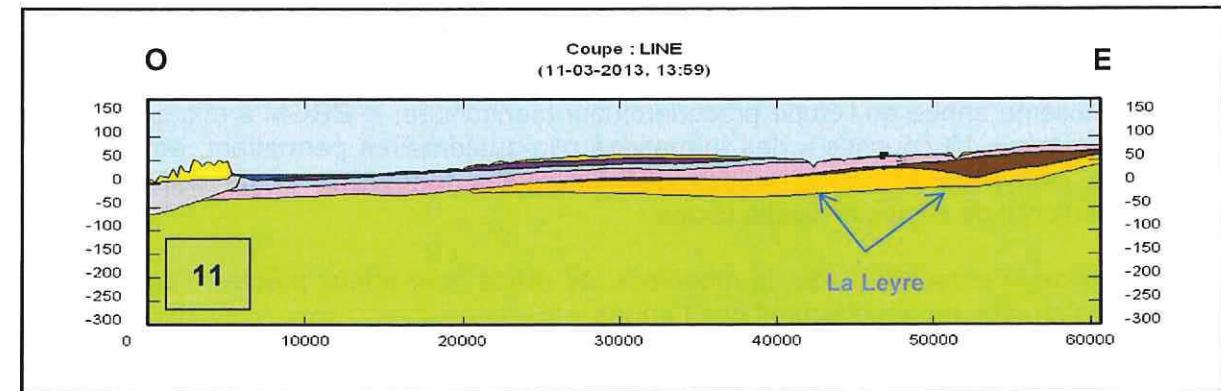


Illustration 49 : Coupes 11 à 14

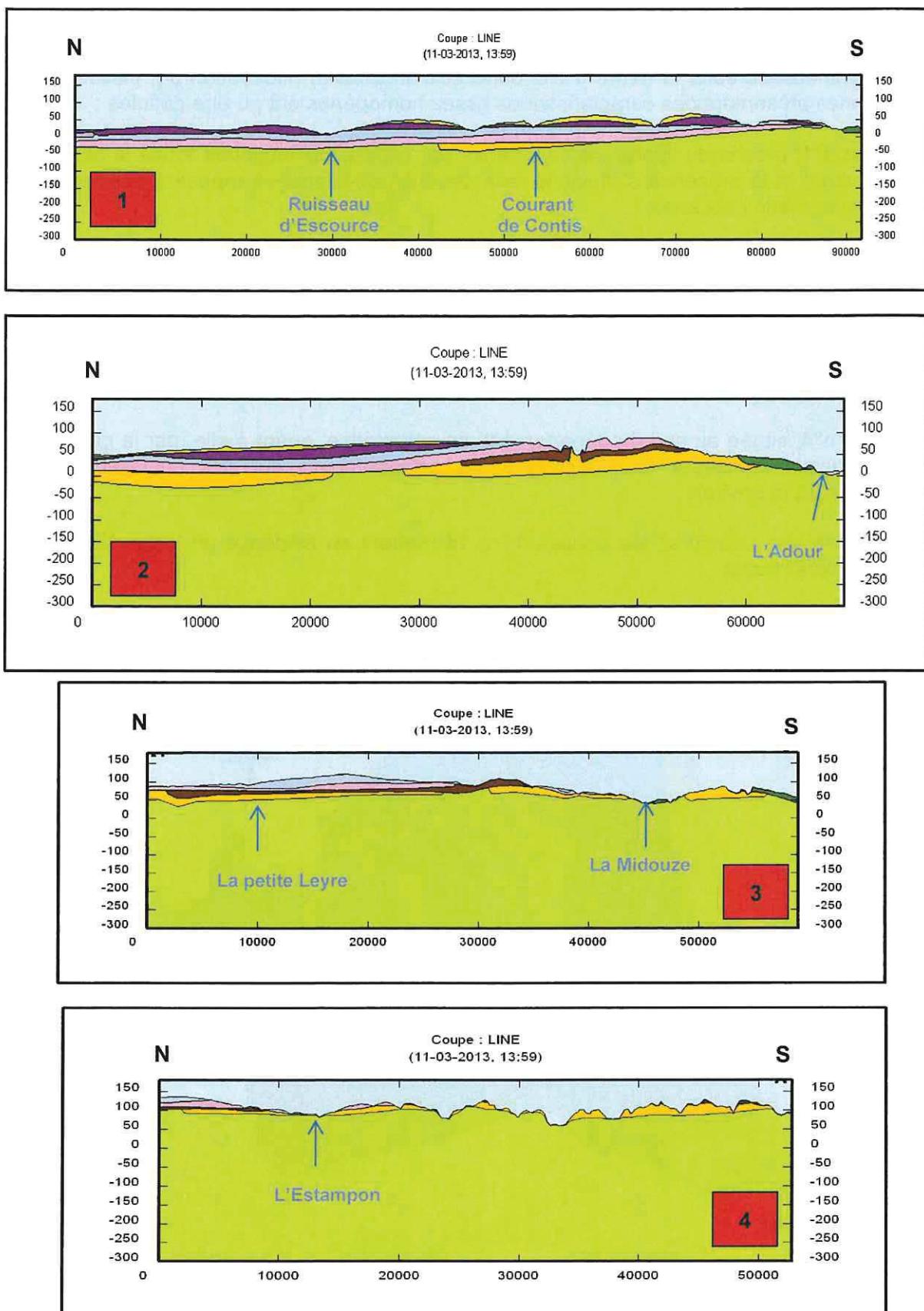


Illustration 50 : Coupes 1 à 4 (légende similaire à illustration 49)

Les informations relatives à la présence et à l'épaisseur des formations mio-plio-quaternaires ont été synthétisées sous la forme d'une carte et d'un tableau (Illustration 51, Illustration 52). Quatre zones présentant des caractéristiques assez homogènes ont pu être définies :

- ☞ **la zone n°1**, proche du littoral, se caractérise par l'épaisseur moyenne totale la plus élevée (60 m environ) et la présence d'alluvions récentes bien développées reposant directement sur le substratum marin miocène.
- ☞ **la zone n°2**, de grande extension, se caractérise par la présence de l'ensemble des formations à l'exception des terrasses anciennes. L'épaisseur moyenne cumulée est de 40 m environ.
- ☞ **la zone n°3**, située à l'est du département, se caractérise par une faible épaisseur cumulée (20 m environ) et des affleurements de sables fauves et de glaises bigarrées.
- ☞ **la zone n°4**, située au sud du département, se caractérise, quant à elle, par la présence de terrasses anciennes assez développées et de sables fauves sur une épaisseur cumulée moyenne de 25 m environ.

D'un point de vue structural, les coupes 11 à 14 mettent en évidence un léger pendage des formations vers l'ouest.

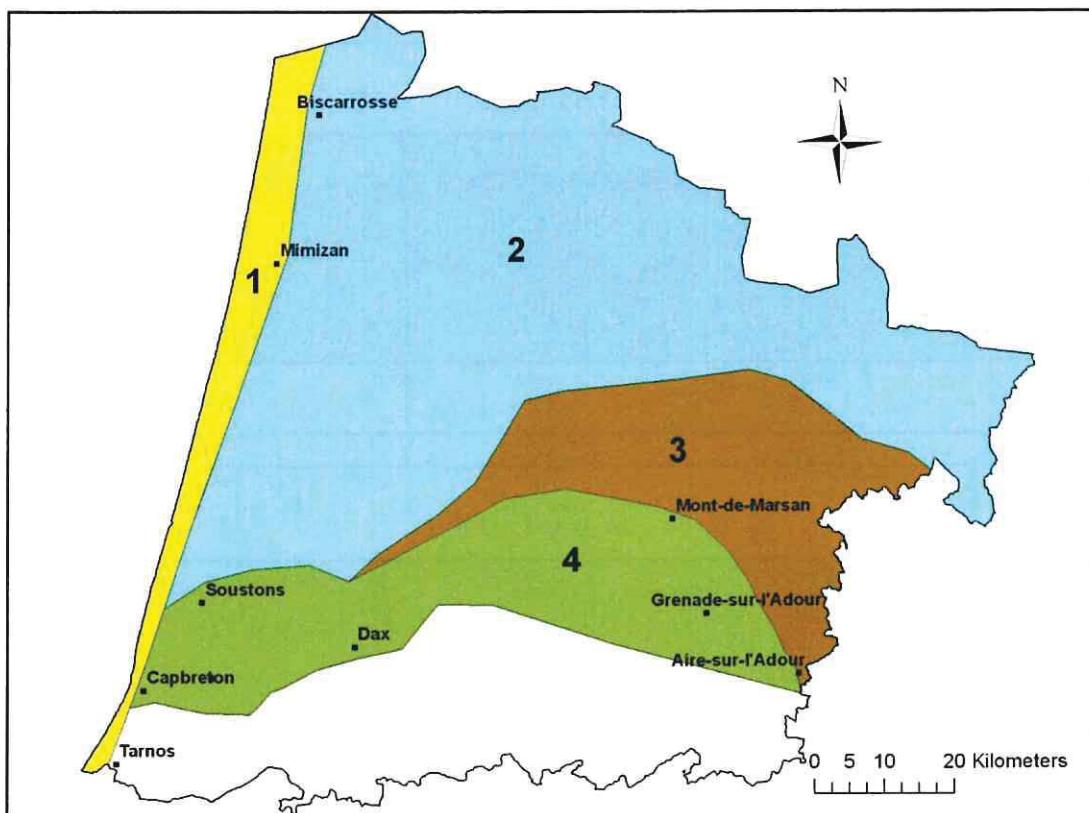


Illustration 51 : Zonation sur la base de critères géologiques

Formations Secteurs	Sables des Landes	Alluvions récentes	Terrasses anciennes	Castet	Onesse	Arengosse	Glaises bigarrées	Sables fauves	Epaisseur des formations jusqu'au substrat marin
1	14m	37-38m	-	-	4m	5m	-	-	60m environ
2	4m	0-1m	-	6m	10-11m	10m	3-4m	3-4m	40m environ
3	1-2m	-	-	-	0-1m	3m	6-7m	10m	20m environ
4	-	-	17m	-	-	-	-	8m	25m environ

Illustration 52 : Epaisseurs moyennes des formations mio-plio-quaternaires sur les 4 zones définies

6.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE

Dans le cadre de la caractérisation des lagunes et de l'identification d'éventuels facteurs de disparition, la nature des formations mio-plio-quaternaires affleurantes, l'épaisseur totale des formations plio-quaternaires ainsi que la nature du substratum sous-jacent ont été déterminées pour chaque site.

6.2.1. Nature des formations mio-plio-quaternaires affleurantes

L'illustration 52 permet de visualiser la répartition des lagunes par rapport aux formations superficielles affleurantes.

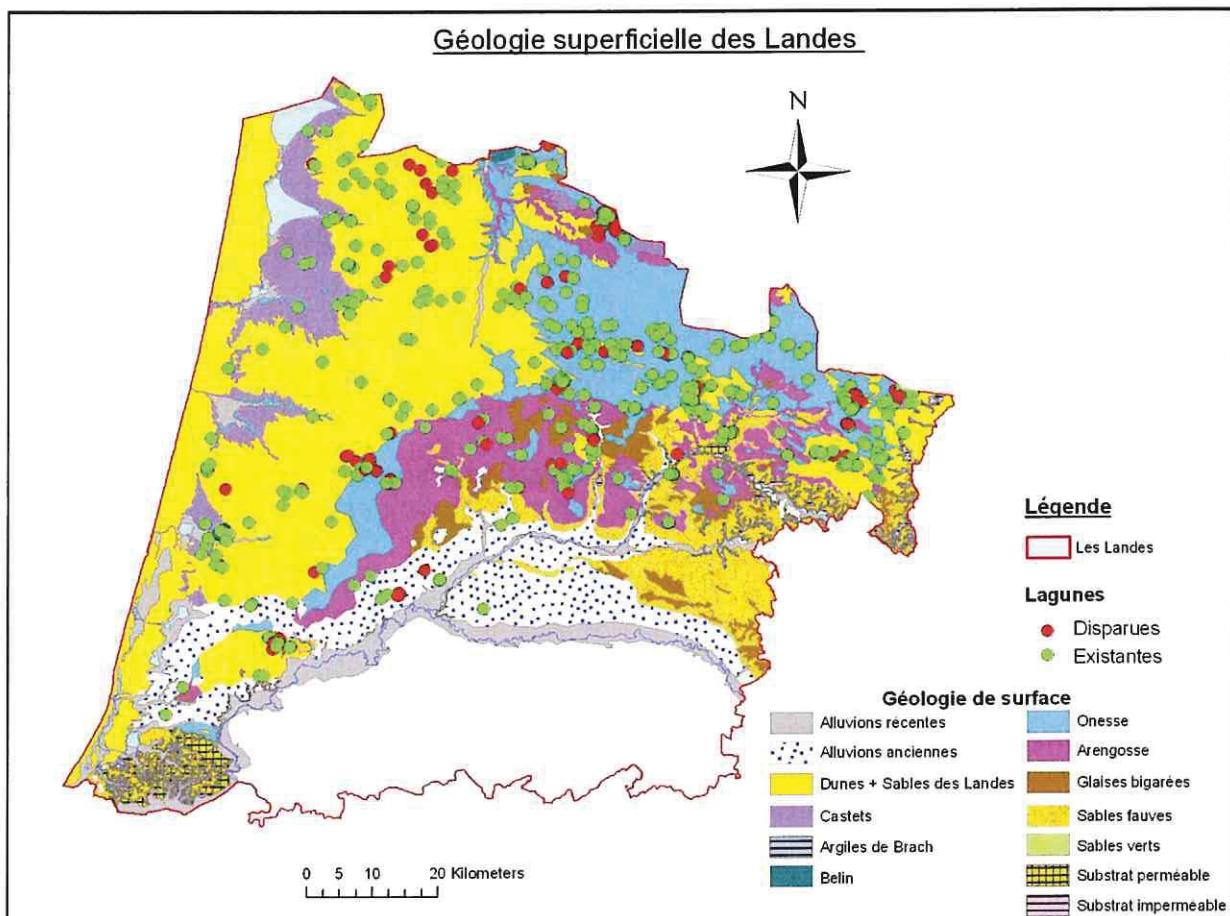


Illustration 53 : Formations mio-plio-quaternaires affleurantes

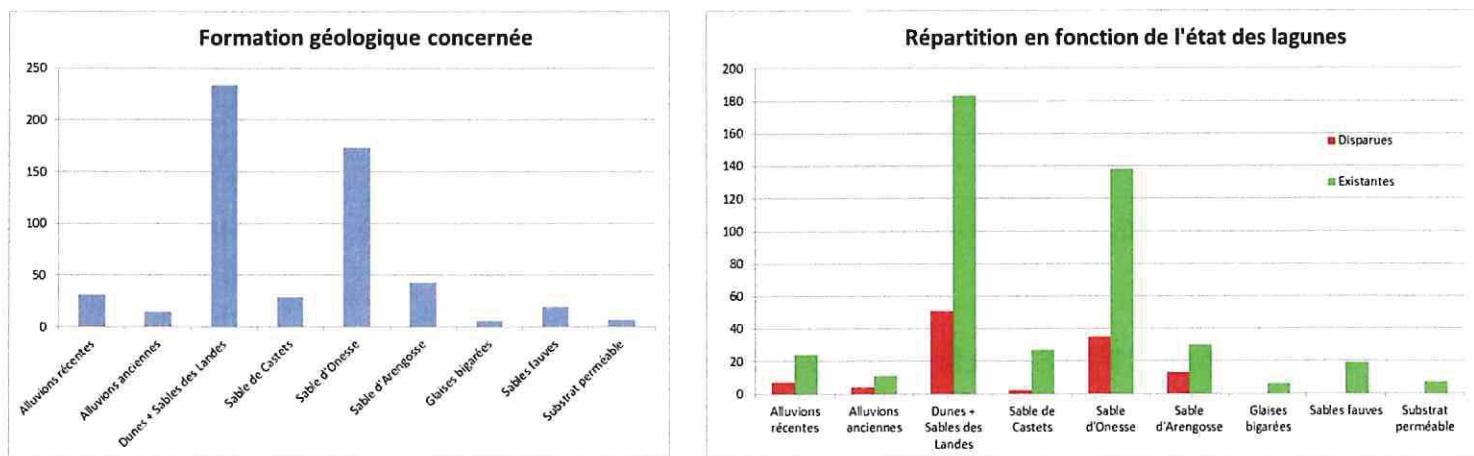


Illustration 54 : Formations mio-plio-quaternaires affleurantes et répartition en fonction de l'état des lagunes

Formations géologiques	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité des formations géologiques (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
Alluvions récentes	7	24	31	6	6	23
Alluvions anciennes	4	11	15	3	4	27
Dunes + Sables des Landes	51	183	234	42	46	22
Sable de Castets	2	27	29	5	2	7
Sable d'Onesse	35	138	173	31	31	20
Sable d'Arengosse	13	30	43	8	12	30
Glaises bigarées	0	6	6	1	0	0
Sables fauves	0	19	19	3	0	0
Substrat perméable	0	7	7	1	0	0
Total général	112	445	557			

Illustration 55 : Détails sur les formations mio-plio-quaternaires affleurantes

Il apparaît que 42 % des lagunes sont implantées au droit de la formation du Sable des Landes, 31 % au droit des sables d'Onesse et 8 % au droit des sables d'Arengosse (Illustration 54 et Illustration 55).

Pour ces 3 formations les plus représentées, les taux de disparition des lagunes sont du même ordre de grandeur (20 à 30 %), ce qui semble indiquer que le contexte géologique n'influence pas leur évolution.

6.2.2. Epaisseur des formations mio-plio-quaternaires

Après avoir déterminé la nature des formations mio-plio-quaternaires affleurant au droit des lagunes, leurs épaisseurs ont été calculées au moyen du modèle géologique décrit au début de ce chapitre et représentées sur l'Illustration 56.

Il apparaît que 67 % des lagunes se situent dans des secteurs où l'épaisseur des formations plio-quaternaires sous-jacentes est comprise entre 0 et 40 m. La tranche d'épaisseur 70-80 m est aussi assez bien représentée avec 12 % des lagunes (Illustration 57 et Illustration 58).

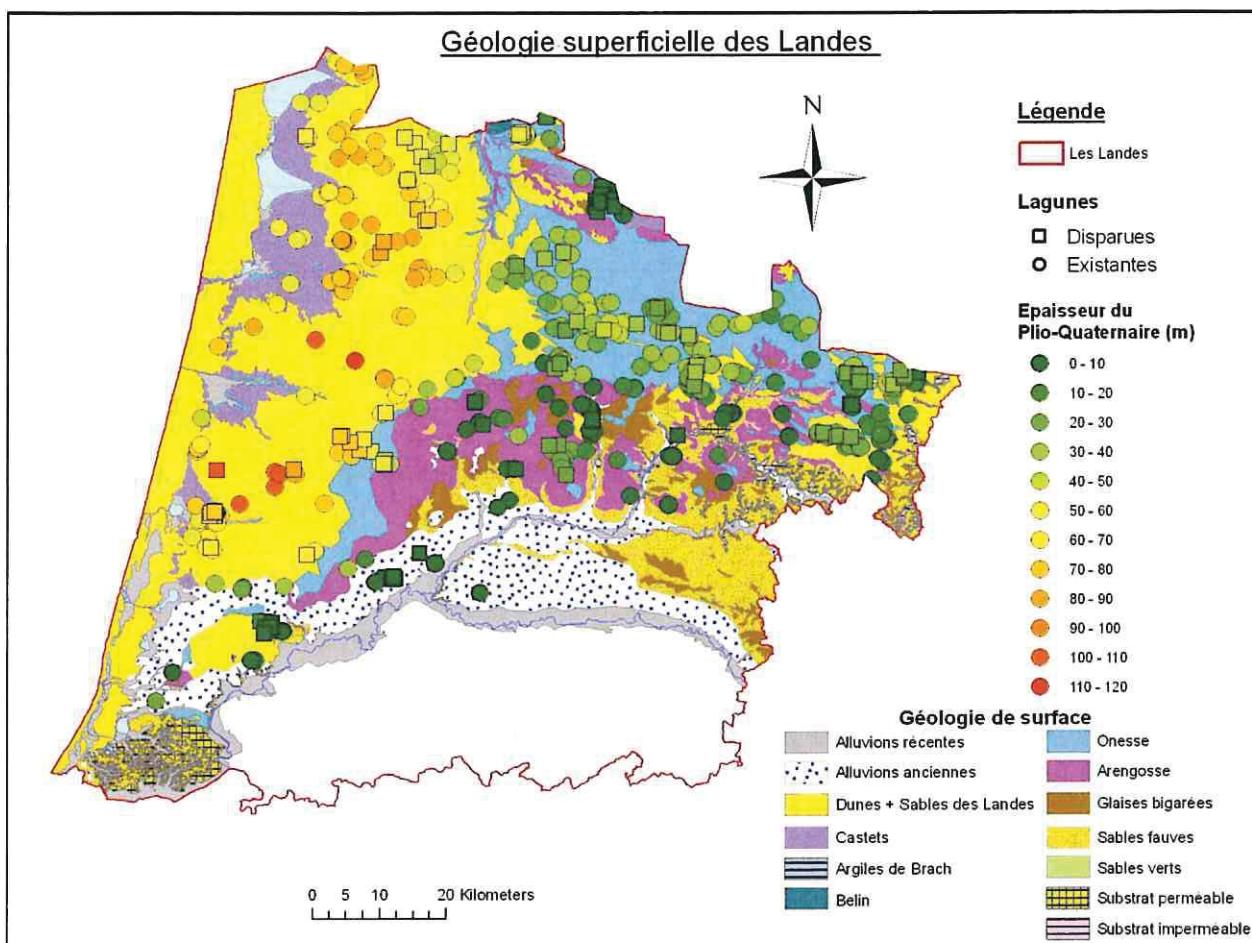


Illustration 56 : Epaisseur des formations plio-quaternaires (limite inférieure = base de la formation d'Arengosse) au droit de chaque lagune

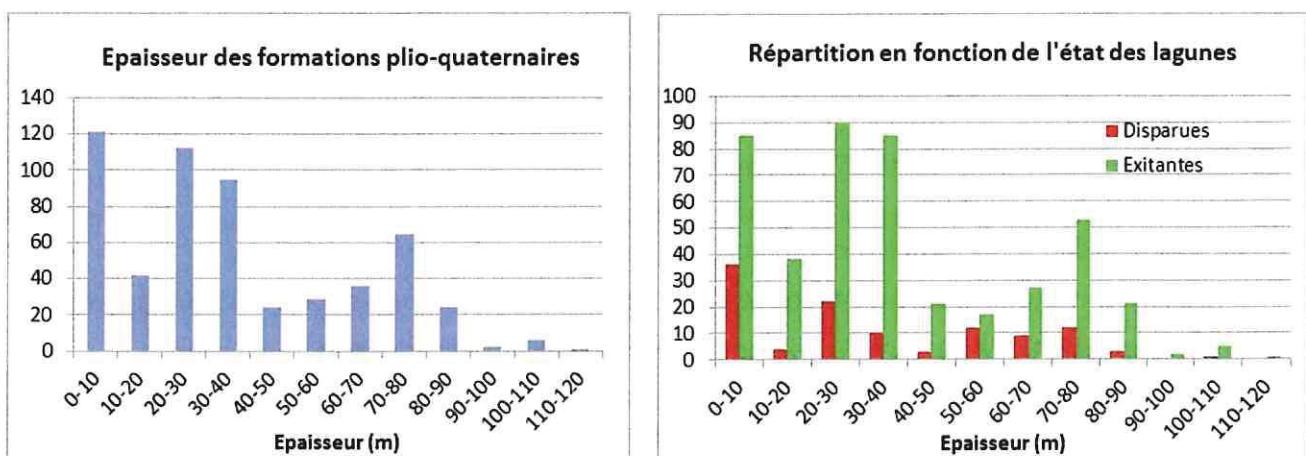


Illustration 57 : Epaisseur des formations plio-quaternaires et répartition en fonction de l'état des lagunes

Epaisseurs des formations plio-quaternaires (m)	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité des classes d'épaisseurs (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes	% de lagunes disparues dans la classe
0-10	36	85	121	22	32	30
10-20	4	38	42	8	4	10
20-30	22	90	112	20	20	20
30-40	10	85	95	17	9	11
40-50	3	21	24	4	3	13
50-60	12	17	29	5	11	41
60-70	9	27	36	6	8	25
70-80	12	53	65	12	11	18
80-90	3	21	24	4	3	13
90-100		2	2	0	0	0
100-110	1	5	6	1	1	17
110-120		1	1	0	0	0
Total général	112	445	557			

Illustration 58 : Détails sur l'épaisseur des formations plio-quaternaires

A l'exception des tranches d'épaisseur 90-100 m et 110-120 m qui présentent des taux de disparition nuls (3 lagunes concernées), les taux de disparition varient entre 10 et 41 %.

Le fait que la quasi-totalité des tranches d'épaisseur soient concernées et que les taux soient assez homogènes laisse penser que l'évolution défavorable connue par certaines lagunes des Landes n'est pas liée à l'épaisseur des formations plio-quaternaires sous-jacentes.

6.2.3. Nature du substratum sous-jacent

La nature du substratum sous-jacent constitue le dernier paramètre d'ordre géologique étudié.

Elle a été déterminée en croisant la couche d'informations « lagunes » avec la BD Lisa (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères). L'histoire et les modalités de mise en place de cette base sont accessibles sur le site :

<http://sigesaqi.brgm.fr/Construction-et-diffusion-du-referentiel-hydrogeologique.html>

L'Illustration 59 permet d'identifier 5 secteurs :

- un premier situé à l'ouest où le substratum des formations plio-quaternaires est constitué d'argiles diachrones du Miocène moyen,
- un second situé au nord-ouest où le substratum est constitué de sables verts et fauves,
- un troisième situé au centre où la nature du substratum est variée,
- un quatrième s'étendant du centre au nord où le substratum est constitué de glaises bigarées ou d'argiles diachrones du Miocène inférieur à moyen,
- un cinquième situé tout à l'est du département où le substratum correspond à des molasses.

Du point de vue statistique, 88 % des lagunes sont implantées au droit de secteurs dont les formations profondes sont constituées de glaises bigarées (46 %), de sables verts et fauves (32 %) ou d'argiles diachrones du Miocène moyen à supérieur (10 %).

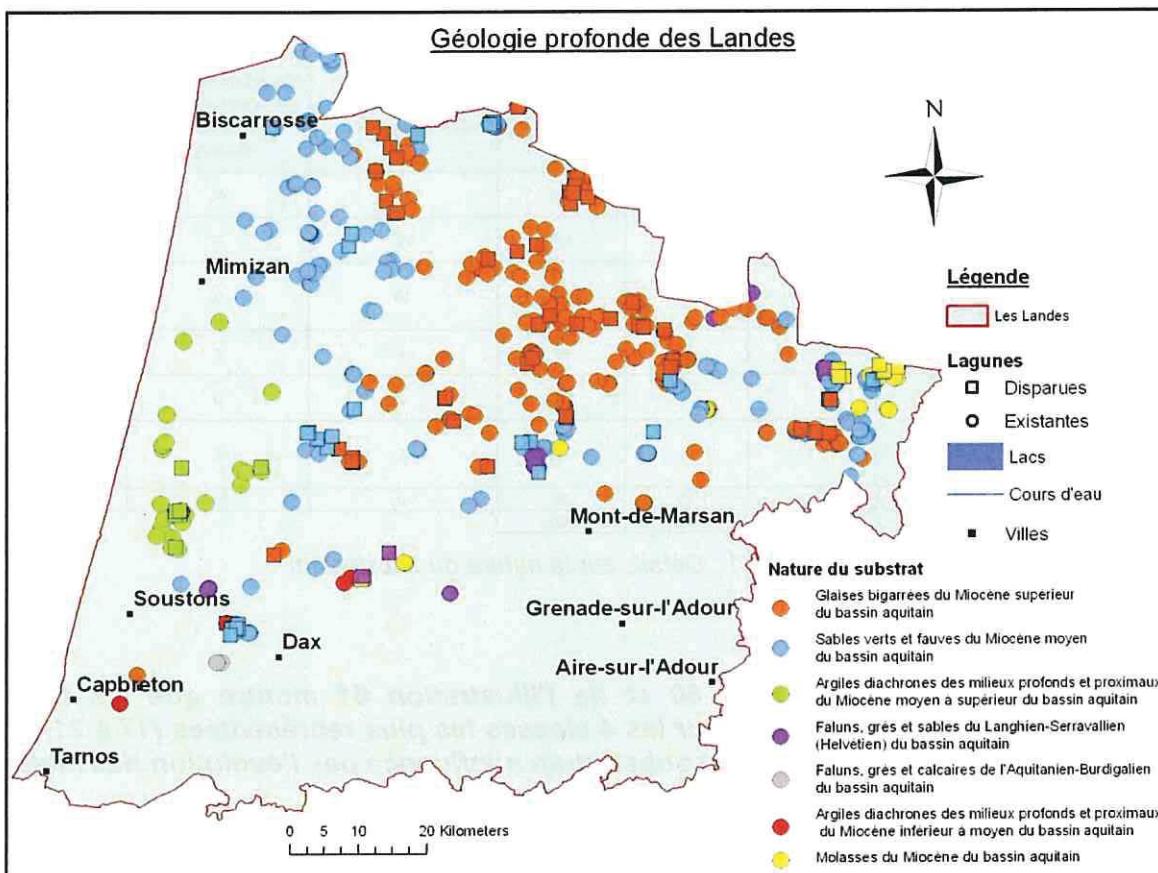


Illustration 59 : Nature du substratum

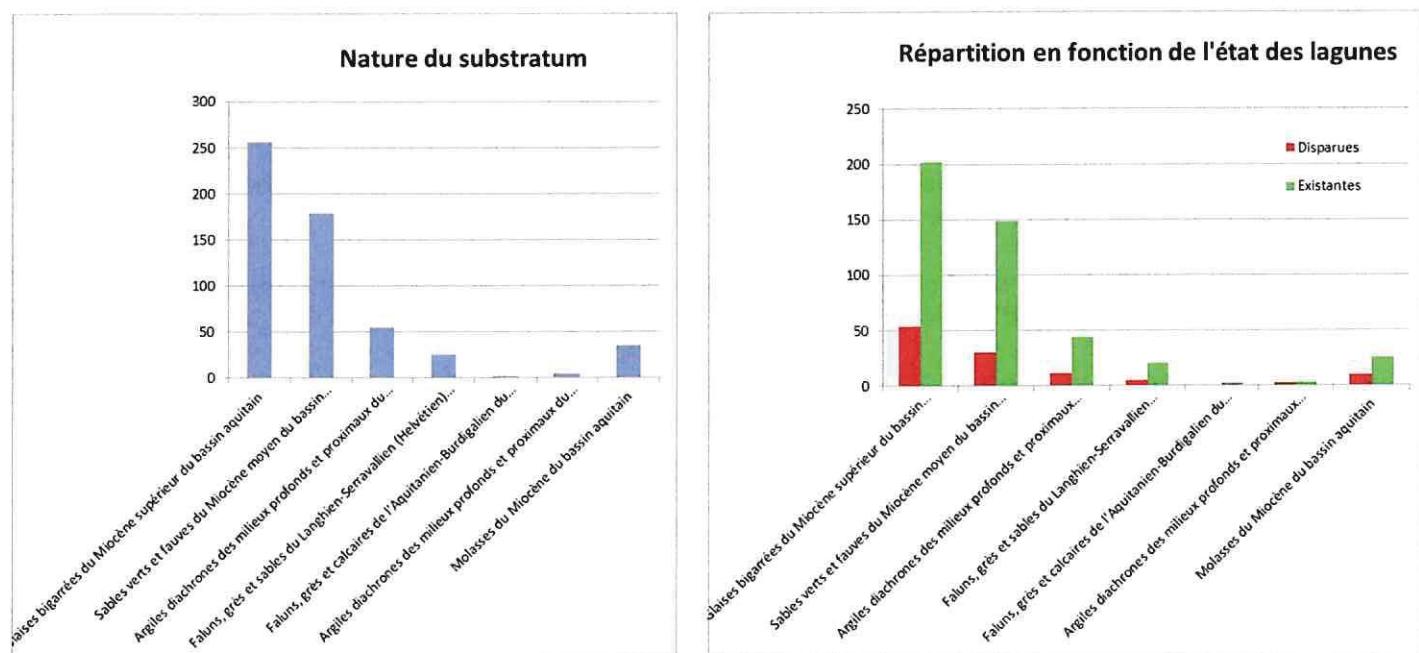


Illustration 60 : Nature du substratum et répartition en fonction de l'état des lagunes

Nature du substrat	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité de la nature du substrat (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
Glaises bigarrées du Miocène supérieur du bassin aquitain	54	202	256	46	48	21
Sables verts et fauves du Miocène moyen du bassin aquitain	30	149	179	32	27	17
Argiles diachrones des milieux profonds et proximaux du Miocène moy à sup du bassin aquitain	11	44	55	10	10	20
Faluns, grès et sables du Langhien-Serravallien (Hévétiens) du bassin aquitain	5	20	25	4	4	20
Faluns, grès et calcaires de l'Aquitaniens-Burdigalien du bassin aquitain		2	2	0	0	0
Argiles diachrones des milieux profonds et proximaux du Miocène inf à moy du bassin aquitain	2	3	5	1	2	40
Molasses du Miocène du bassin aquitain	10	25	35	6	9	29
Total général	112	445	557			

Illustration 61 : Détails sur la nature du substratum

L'examen détaillé de l'Illustration 60 et de l'Illustration 61 montre que les taux de disparition sont quasi identiques pour les 4 classes les plus représentées (17 à 21 %), ce qui semble indiquer que la nature du substratum n'influence pas l'évolution des lagunes.

6.3. BILAN

Parmi les facteurs examinés dans ce chapitre (formations affleurantes au droit des lagunes, épaisseur du Plio-Quaternaire, nature du substratum), aucun ne semble conditionner le maintien ou la disparition des lagunes.

On retiendra par ailleurs que :

- *l'épaisseur des formations plio-quaternaires est comprise entre 25 et 60 m au droit du département des Landes, les plus fortes épaisseurs étant observées au niveau de la bordure littorale,*
- *42 % des lagunes sont implantées dans la formation du Sable des Landes, 31 % dans la formation d'Onesse et 8 % dans la formation d'Arengosse,*
- *la plupart des lagunes (67 %) se situent dans un environnement où l'épaisseur des formations plio-quaternaires est comprise entre 0 et 40 m,*
- *près de la moitié des lagunes (46 %) se situent dans un environnement où le substratum est constitué par les glaises bigarrées du Miocène.*

7. Autres facteurs

En complément de la caractérisation précédente, il est proposé d'étudier dans ce chapitre l'occupation du sol et la proximité des fossés, 2 paramètres liés à l'activité anthropique.

7.1. OCCUPATION DU SOL

En 2013, le bureau d'études SIRS, spécialisé dans la production de données géographiques à partir d'images satellites ou aériennes, a réalisé une étude des continuités écologiques du département des Landes pour le compte du Département des Landes.

Ce travail a permis de fournir au département une information géographique sur les éléments « naturels » et « non naturels » ainsi qu'une analyse statistique de leur structuration spatiale.

L'illustration 62, présentée dans le document de synthèse, permet de visualiser la répartition des différentes surfaces. Elle montre en particulier que plus de la moitié du département est recouverte de forêts de feuillus et de résineux. Les zones artificialisées (les zones de culture, les zones bâties et aménagées et les réseaux routiers et ferrés) représentent 26 % de la surface. Les landes (ou coupes rases), les prairies et les zones en eau représentent, quant à elles, 23 % de la surface du département.

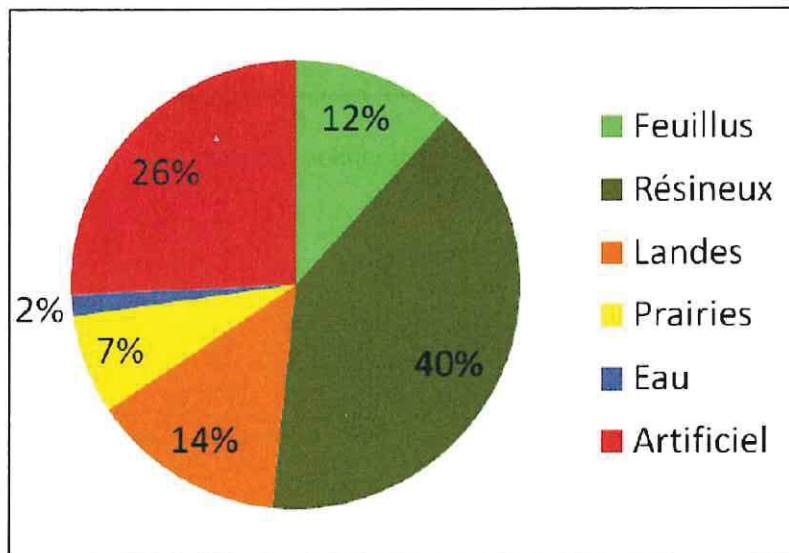


Illustration 62 : Répartition des surfaces au droit du département des Landes (d'après SIRS, 2013)

L'illustration 63, établie au moyen des données SIRS transmises par le Département, permet d'apprécier la répartition géographique de ces différents types de surfaces. On y distingue clairement 2 zones : une première située au nord d'une ligne Dax/Mont-de-Marsan essentiellement occupée par des forêts de feuillus et de résineux et des landes et une seconde, située au sud de cette même ligne, qui se caractérise par la présence de très nombreuses zones de culture.

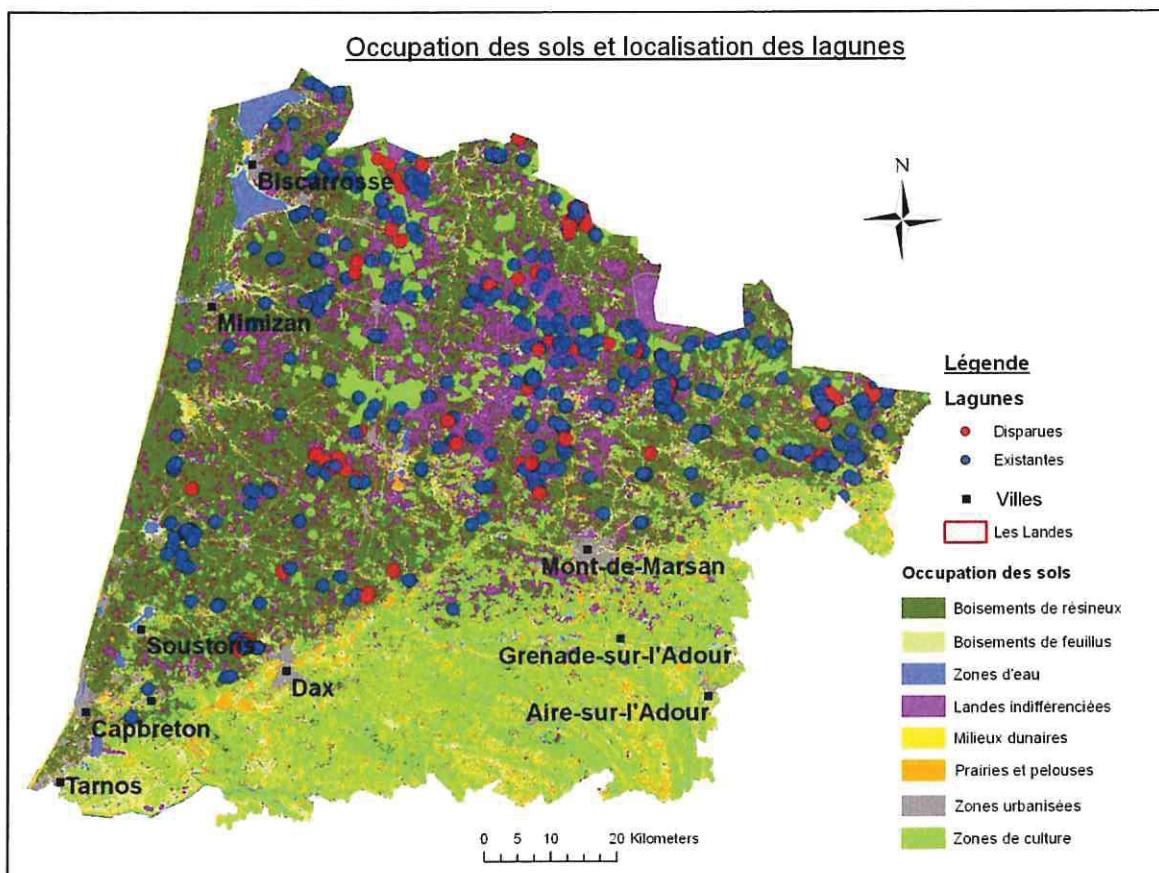


Illustration 63 : Occupation des sols

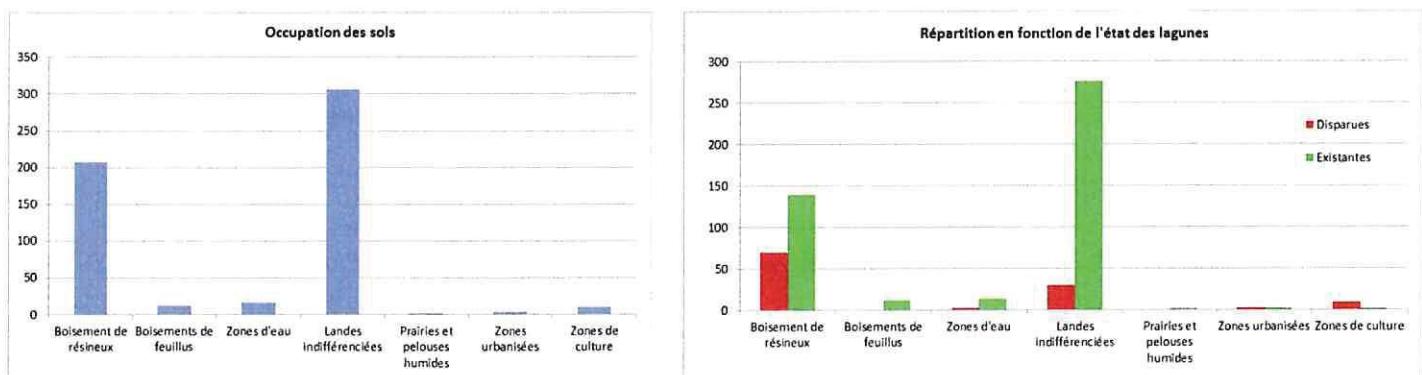


Illustration 64 : Occupation des sols et répartition en fonction de l'état des lagunes

Occupation des sols	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité des occupations de sol (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes	% de lagunes disparues dans la classe
Boisement de résineux	69	139	208	37	62	33,2
Boisements de feuillus		12	12	2	0	0
Zones d'eau	2	14	16	3	2	13
Landes indifférenciées	30	276	306	55	27	10
Prairies et pelouses humides		1	1	0	0	0
Zones urbanisées	2	2	4	1	2	50
Zones de culture	9	1	10	2	8	90
Total général	112	445	557			

Illustration 65 : Détails sur l'occupation des sols

L'Illustration 64 et l'Illustration 65 permettent de voir que 92 % des lagunes recensées sont implantées au droit de forêts de résineux ou de landes indifférenciées, soit en contexte forestier.

Parmi les lagunes implantées au droit des zones urbanisées ou de culture, 50 à 90 % ont logiquement disparues. Le nombre total de lagunes concernées reste toutefois faible (11 lagunes disparues sur un total de 14).

En ce qui concerne les autres zones d'implantation, on remarque un taux de disparition au droit des forêts de résineux beaucoup plus important (33 %) qu'au droit des zones de landes (10 %) avec des échantillons représentatifs respectifs de 208 et 306 lagunes.

Partant de cette observation, une réflexion a été menée sur les évènements ayant affecté la forêt de pins entre 1994 et 2005 (dates des différents inventaires). La tempête « Martin » du 26 décembre 1999 constitue l'évènement le plus marquant (13 000 ha dévastés dans les Landes).

Les travaux sylvicoles au sens large ainsi que les modifications de l'écosystème engendrées par cette tempête, par les interventions qui ont suivi pour valoriser le bois à terre et par la replantation des parcelles endommagées pourraient être à l'origine d'une partie des disparitions de lagunes.

Dans le cadre de la **régénération des parcelles**, l'ONF (Office National des Forêts) et le CRPF (Centre Régional de la Propriété forestière) ont en effet souligné la nécessité de vérifier le bon fonctionnement du réseau d'assainissement et de procéder au curage des fossés existants et à la création éventuelle de fossés complémentaires.

Le niveau de l'eau doit être maîtrisé pour assurer l'installation du semis ou de la plantation; permettre à l'enracinement de bien se développer, améliorer la portance des sols pour les tracteurs et les engins de DFCI et limiter la végétation combustible (type molinie).

Au final, le drainage est assuré par un réseau de fossés qui permet de rabattre la nappe selon le schéma suivant (Illustration 66).

Si les pratiques culturales et le drainage intensif menés dans les années 80-90 sont identifiés comme une des causes les plus probables de la disparition des lagunes (- 53 % entre 1983 et 1994 d'après l'étude GEREA), les travaux sylvicoles au sens large ainsi que la régénération de certaines parcelles consécutive à la tempête Martin de 1999 pourraient avoir à nouveau modifié les conditions hydrodynamiques et engendré la disparition de nouvelles lagunes (- 28 % entre 1994 et 2005-2008) dans un contexte néanmoins plus respectueux de l'environnement que par le passé (effets de la loi sur l'Eau, évolution des mentalités, volonté des sylviculteurs de faire les choses comme il faut...).

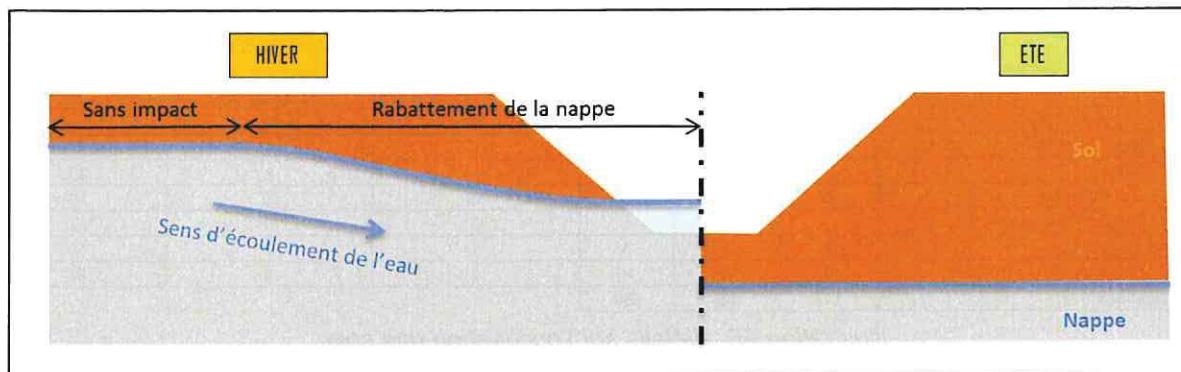


Illustration 66 : Schéma représentant le drainage assuré par les fossés (modifié, d'après ONF, 2013)

7.2. PROXIMITE DES FOSSES

7.2.1. Données bibliographiques

Dès 1994, le bureau d'études GERA avait mentionné l'impact négatif des fossés de vidange sur les lagunes ; ces derniers provoquant une accélération de la baisse des eaux, limitant fortement la durée d'inondation des zones périphériques des lagunes et diminuant la hauteur maximale des niveaux d'eau. Les fossés d'alimentation perturberaient aussi le fonctionnement hydraulique des lagunes en provoquant des apports d'eau brusques et importants et en favorisant leur comblement par des apports de sédiments (sable essentiellement).

Des recommandations étaient formulées pour le maintien des lagunes :

- pour les lagunes situées sur des terrains peu drainés : la connexion à un fossé d'alimentation ne serait pas souhaitable,
- pour les lagunes fortement asséchées : la connexion à un fossé d'alimentation pourrait représenter une mesure de restauration intéressante à condition de limiter les impacts négatifs avec un calibrage limité, une végétalisation des berges et une pente générale faible.

Plus récemment (en 2008), l'ONF et le CRPF ont publié une notice technique sur les techniques de gestion des réseaux de drainage.

Les problèmes de fossés surdimensionnés (profondeur supérieure à 1 m), l'absence de cohérence vis à vis des objectifs, le manque de prise en compte de la pente naturelle ou la réalisation de fossés de profondeur constante y sont rappelés.

La notice porte aussi sur des opérations expérimentales menées pour réduire l'efficacité des fossés et des canaux (mise en place de seuils, recalibrage ou déconnexion au réseau existant) ; l'objectif étant de réduire les phénomènes d'érosion régressive et ceux liés à l'abaissement de la nappe superficielle.

A l'heure actuelle, la gestion des cours d'eau et des fossés reste un enjeu sur le territoire landais. Elle a conduit la DDTM40 à établir une « Charte de bonnes pratiques de l'entretien des cours d'eau » signée par différents partenaires (Département 40, DFCI d'Aquitaine et des Landes, Chambre d'Agriculture 40 et CRPF) et à recenser les fossés qui font l'objet d'une cartographie gérée par le GIP ATGERI (http://sig.cartogip.fr/referentiels_hydro_consultation).

7.2.2. Analyse des données disponibles

Si les effets négatifs du drainage sont connus, ils restent difficiles à quantifier. Pour tenter de les évaluer, une approche similaire à celles réalisées pour les autres facteurs de risques de disparition a été menée en étudiant la distance des lagunes au fossé le plus proche (sur la base de la cartographie mentionnée plus haut).

Il est à noter que la couche d'information récupérée auprès du GIP correspond au recensement le plus abouti des fossés. Elle peut cependant contenir des erreurs et ne pas être exhaustive (cas des petits fossés en particulier).

L'illustration 67 permet de noter que la plupart des lagunes se situent à moins de 1 km du fossé le plus proche. Dans le détail, l'illustration 68 et l'illustration 69 montrent que 38 % des lagunes se situent à moins de 200 m d'un fossé et 76 % à moins de 600 m.

En ce qui concerne les taux de disparition, ils sont relativement similaires pour les tranches 0-200 m à 1600-1800 m (autour de 20 %) à l'exception de la tranche 1400-1600 m mais dans ce cas, l'échantillon est assez peu représentatif (6 lagunes concernées).

Une analyse plus fine de la répartition des 212 lagunes situées à moins de 200 m d'un fossé a été réalisée par tranches de distances de 20 m mais elle n'a pas mis en évidence de taux de disparition plus élevé pour les lagunes situées dans les environs immédiats d'un fossé.

Il semblerait donc que le taux de disparition des lagunes ne soit pas corrélé avec la distance au fossé le plus proche. La morphologie des fossés (pente, profondeur, connexions...) pourrait constituer un facteur plus impactant mais ces paramètres ne sont malheureusement pas disponibles à grande échelle.

7.3. BILAN

Le fort taux de lagunes disparues observé au sein de la forêt de résineux entre 1994 et 2005 laisse supposer que les travaux sylvicoles au sens large et la tempête « Martin » intervenue en décembre 1999 ont pu contribuer à leur évolution. A l'occasion de la régénération des parcelles, certains travaux de drainage ont pu avoir un impact négatif, comme l'ont eu auparavant les grands travaux agricoles des années 80-90.

L'impact des fossés ne semble toutefois pas systématique. Leur morphologie pourrait même jouer un rôle plus important que la distance qui les sépare des lagunes.

En l'absence de données précises sur les distances d'influence autour des lagunes et sur la typologie des fossés à grande échelle, seule l'étude de cas particuliers pourrait permettre de valider ce facteur de disparition.

A cette occasion, la mise en œuvre de techniques novatrices (télédétection, drone, ULM, lever LIDAR...) pourrait être envisagée pour mieux appréhender la géométrie des fossés.

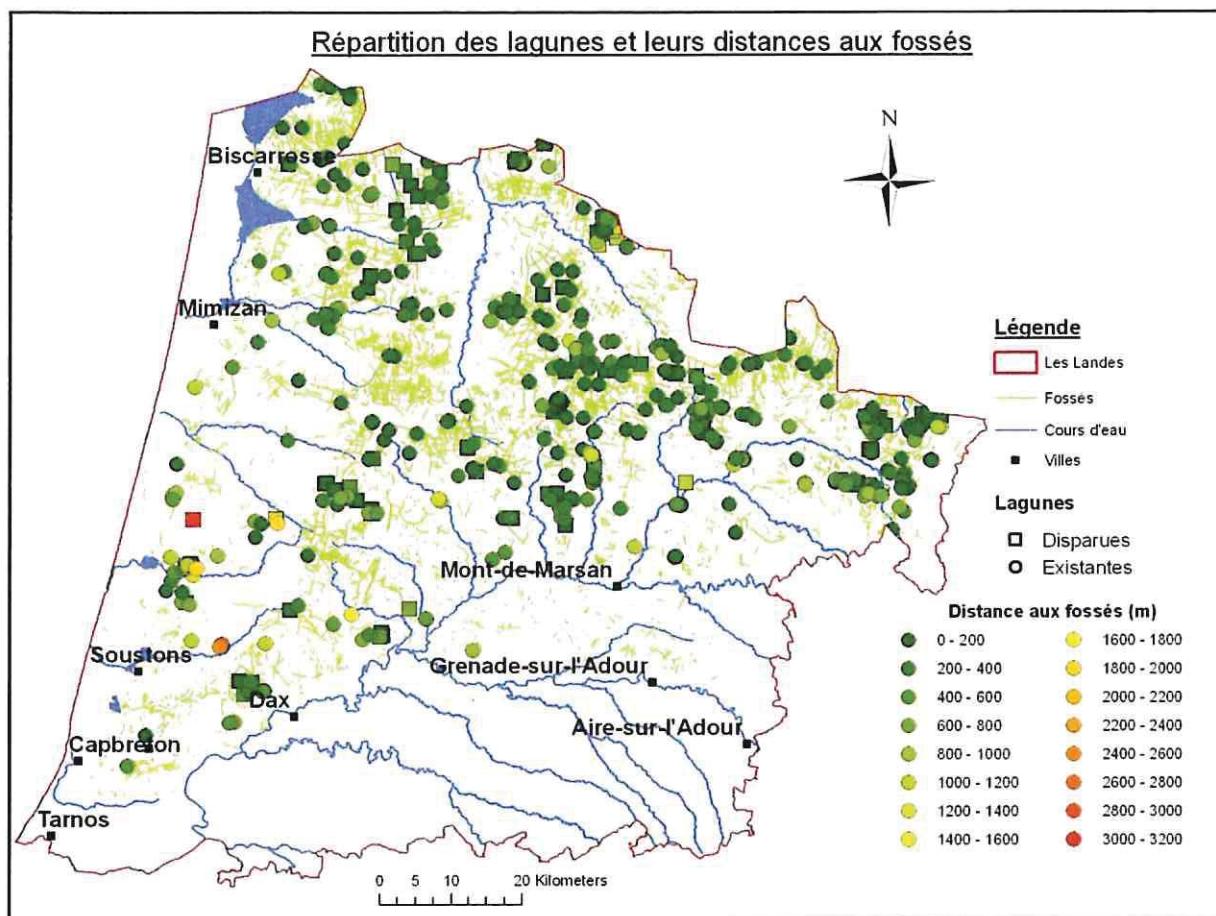
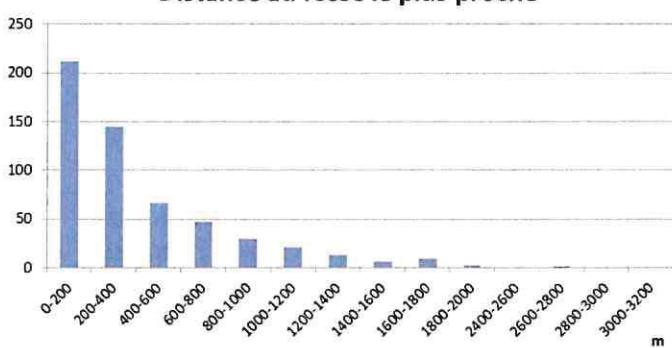


Illustration 67 : Distance au fossé le plus proche

Distance au fossé le plus proche



Répartition en fonction de l'état des lagunes

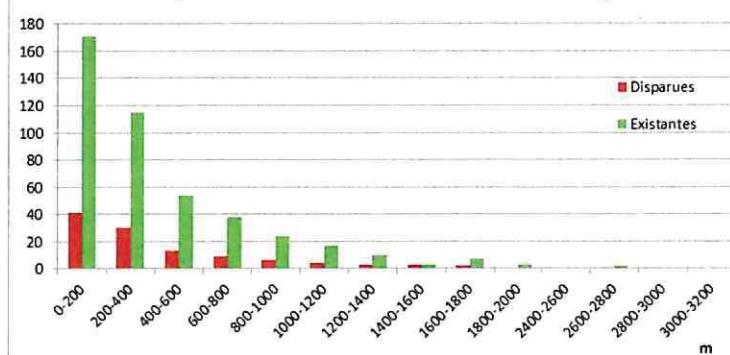


Illustration 68 : Distance au fossé le plus proche et répartition en fonction de l'état des lagunes

Distance au fossé le plus proche (m)	Nombre de lagunes disparues	Nombre de lagunes existantes	Nombre total de lagunes	Représentativité des classes de distances (%)	% de lagunes disparues par rapport au nombre total de lagunes disparues	% de lagunes disparues dans la classe
0-200	41	171	212	38	37	19
200-400	30	115	145	26	27	21
400-600	13	54	67	12	12	19
600-800	9	38	47	8	8	19
800-1000	6	24	30	5	5	20
1000-1200	4	17	21	4	4	19
1200-1400	3	10	13	2	3	23
1400-1600	3	3	6	1	3	50
1600-1800	2	7	9	2	2	22
1800-2000		3	3	1	0	0
2400-2600		1	1	0	0	0
2600-2800		2	2	0	0	0
2800-3000						
3000-3200	1		1	0	1	100
Total général	112	445	557			

Illustration 69 : Détails sur la distance au fossé le plus proche

8. Identification des facteurs de disparition

En l'état des connaissances, il apparaît que l'évolution des conditions climatiques (augmentation des températures et diminution des précipitations qui ont eu un léger impact sur le niveau des eaux souterraines) et/ou les pratiques agricoles (drainage intensif dans les années 80-90 et sylviculture) constituent les hypothèses les plus probables de disparition des lagunes.

Afin d'invalider définitivement une contribution de certains facteurs (géographiques, géologiques...), une analyse en composantes principales (ACP) a été menée sur tous les paramètres numériques analysés précédemment :

- Altitude du centroïde
- Pente dans un rayon de 50 m
- Distance à la crête la plus proche
- Distance à l'exutoire (normée par rapport à la distance maximale)
- Epaisseur des formations plio-quaternaires
- Distance au fossé le plus proche

L'analyse en composante principales est en effet une méthode factorielle qui permet de mettre en évidence la structure des relations qui existent entre les variables d'une matrice de données comportant n variables et m individus.

La première étape consiste à déterminer les directions préférentielles d'allongement du nuage à n dimensions. L'ensemble des points est ensuite projeté dans le plan déterminé par les axes factoriels. Le premier axe est celui qui explique le plus grand pourcentage de la variance totale, le second, celui qui explique le plus grand pourcentage de la variance résiduelle. Les coordonnées des individus (les composantes principales) sont ensuite calculées. C'est la comparaison des diagrammes des variables et des individus qui permet enfin d'apporter des éléments de compréhension.

Afin de donner le même poids à toutes les variables, les données ont été centrées réduites à l'exception de l'état des lagunes qui a fait l'objet d'un codage (« 0 » pour disparue entre 1994 et 2005-2008 et « 1 » pour existante).

L'illustration 70 représente le diagramme des variables obtenu au moyen du logiciel XLSTAT. Il apparaît que les facteurs F1 et F2 n'expliquent que 49 % de la variance totale et que les variables sont assez éloignées du cercle de corrélation. Des corrélations sont toutefois mises en évidence (proximité des variables sur le diagramme) mais seule la corrélation entre l'altitude du centroïde de la lagune et la distance à l'exutoire normée semble logique.

La position de la variable « état », loin de tout autre paramètre, semble confirmer que l'état des lagunes (existante ou disparue) n'est lié à aucune des autres caractéristiques.

Le diagramme des individus (Illustration 71) ne met, quant à lui, pas en évidence de groupes au sein des 557 lagunes prises en compte.

L'ACP confirme donc que la disparition des lagunes n'est pas liée à des facteurs géographiques, géologiques ou à la proximité d'aménagements favorisant le drainage. Elle serait en fait d'avantage liée aux facteurs climatiques qui ont engendré une baisse des niveaux piézométriques et/ou aux aménagements locaux (surcreusement de fossés par exemple) en lien possible avec la tempête de 1999.

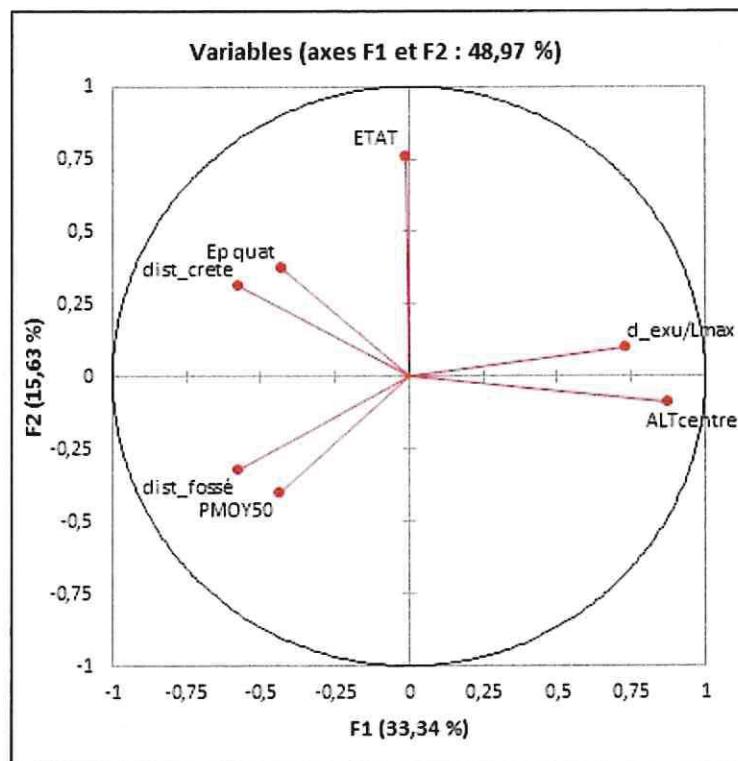


Illustration 70 : Diagramme des variables

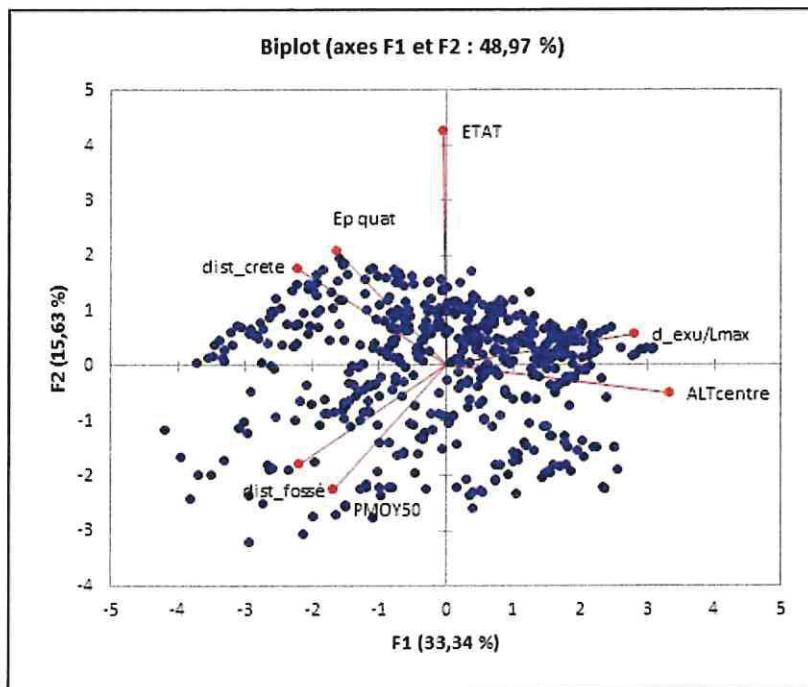


Illustration 71 : Diagramme des individus

9. Echantillonnage de 5 lagunes

Afin de compléter la caractérisation des lagunes menée dans les chapitres précédents, 5 sites ont fait l'objet de prélèvements d'eau et de sols.

Ces sites ont été choisis en collaboration avec le Département. Il s'agit des lagunes SAUG07 à Saugnacq-et-Muret, GELO03 à Geloux, CERE01 à Cere, ARUE08 à Arue et ESCA02 à Escalans (Illustration 72).

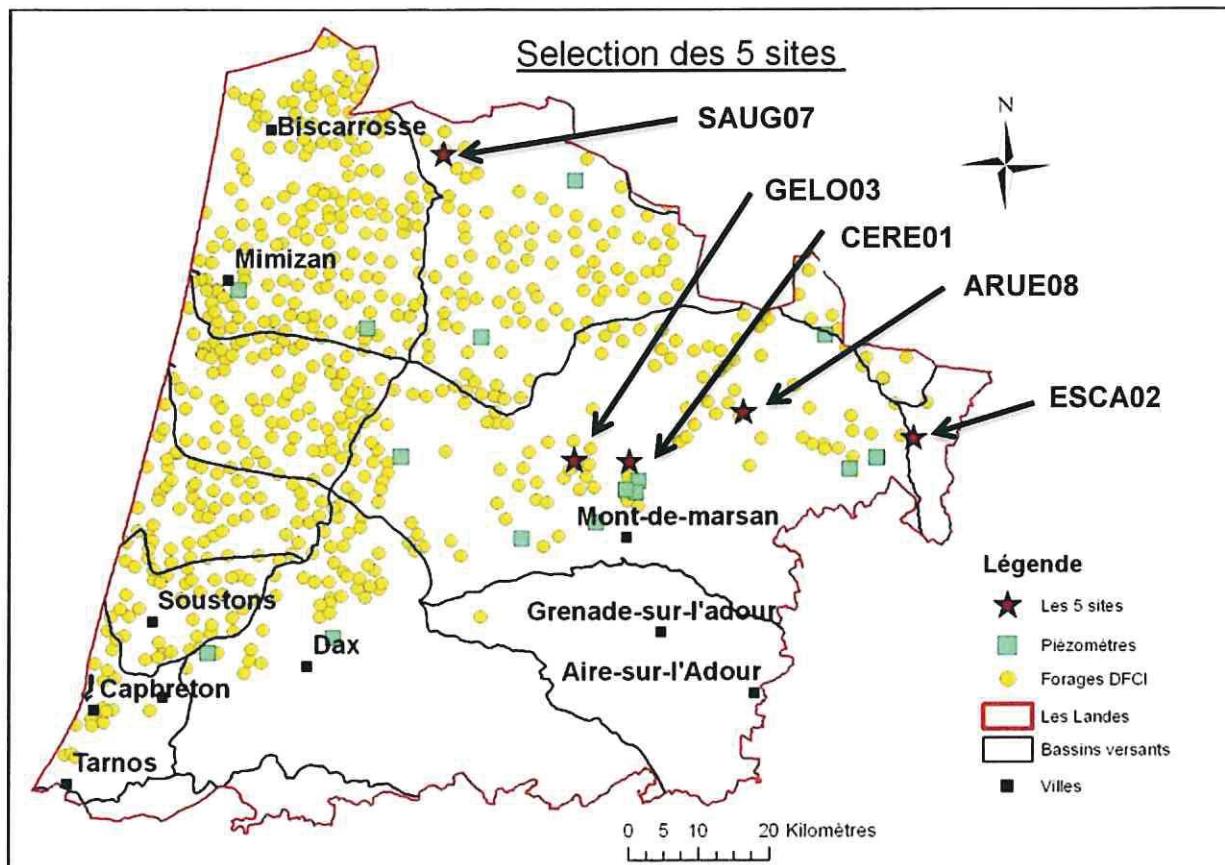


Illustration 72 : Localisation des 5 sites échantillonnés

Le choix s'est effectué sur la base de critères fonciers, écologiques, morphologiques, géologiques et hydrogéologiques (Illustration 73) avec le souci de ne pas retenir de lagunes aux caractéristiques trop atypiques.

Au final, le choix s'est porté sur 2 sites peu évolués dits « de référence » et 3 autres sites dits « perturbés ».

Critères	Sites	Sites de référence		Sites perturbés		
		CERE01	GELO03	ARUE08	ESCA02	SAUG07
CRITERES FONCIERS	Maitrise foncière	privé (convention possible)	Publique/Privé (convention possible)	communal	communal	communal
CRITERES ECOLOGIQUES	Site	naturel	naturel	modifié	naturel	modifié
	Faciès d'évolution (végétation)	moyennement évolué	moyennement évolué	peu évolué	moyennement évolué	moyennement évolué
CRITERES MORPHOLOGIQUES	Taille	>1ha	>1ha	>1ha	<1ha	<1ha
	Altitude (m)	81	74	80	149	56
	Isolément	isolé	groupe	groupe	groupe	isolé
	Place site dans le bassin versant	tête	tête	tête	tête	médiane
	Occupation du sol	Lagunes de Haute-Lande	Lagunes de Haute-Lande	Lagunes de Haute-Lande	Lagunes de Haute-Lande + parcelles agricoles	Landes non humides issues de boisements de résineux
CRITERES GEOLOGIQUES	Nature affleurement	Sables et graviers d'Arengosse (Plio-Quaternaire)	Sables et graviers d'Onesse et de Belin (Plio-Quaternaire)	Sables verts et fauves du Miocène moyen du bassin aquitain	Sables et graviers d'Onesse et de Belin (Plio-Quaternaire)	Sables des Landes et de Castets (Plio-Quaternaire)
	Epaisseur du Plio-Quaternaire (m)	18,1	26,2	0,0	13,6	47,9
CRITERES HYDROGEOLOGIQUES	Hydraulique	naturel	naturel	modifié	modifié	modifié
	Données piézométriques	données anciennes + suivi (3 piézomètres de 2m)	suivi prévu avec 1 piézomètre	données anciennes	suivi prévu avec 1 piézomètre de 2m	suivi prévu
	Distance Fossés (m)	278,7	219,4	121,0	74,5	29,5
	Présence d'un réseau hydraulique dans le périmètre rapproché	non	non	oui	oui (draine la lagune)	oui (fossés alimentation et drainage)
	Distance DFCI (m)	2261,8	875,2	943,2	1873,8	466,0

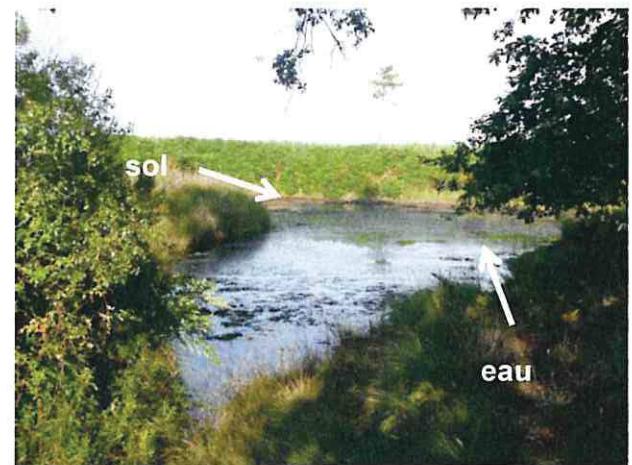
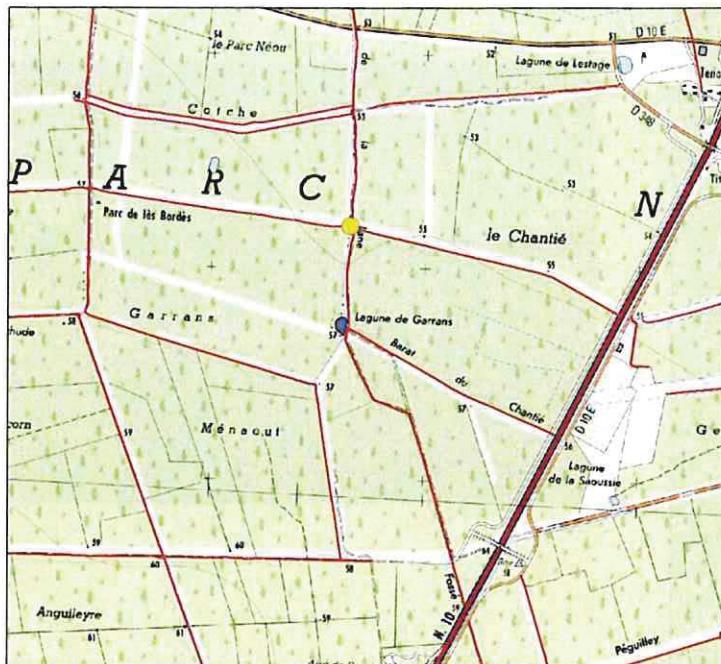
Illustration 73 : Caractéristiques des 5 sites retenus

Chaque site a fait l'objet d'une fiche (Illustration 74, Illustration 75, Illustration 76, Illustration 77, Illustration 78) qui permet de visualiser :

- la lagune et son environnement sur fond topographique,
- les ouvrages DFCI et les fossés recensés dans les environs immédiats.

Lorsque cela a été possible, les sites de prélèvement d'eau et de sol ont été rajoutés sur les photos qui accompagnent les plans.

Lagune de Saugnacq et Muret



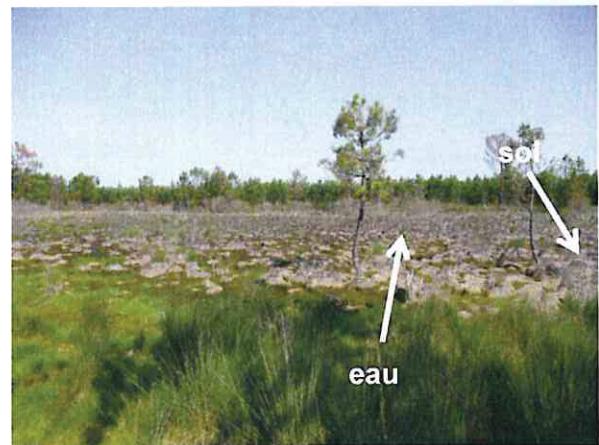
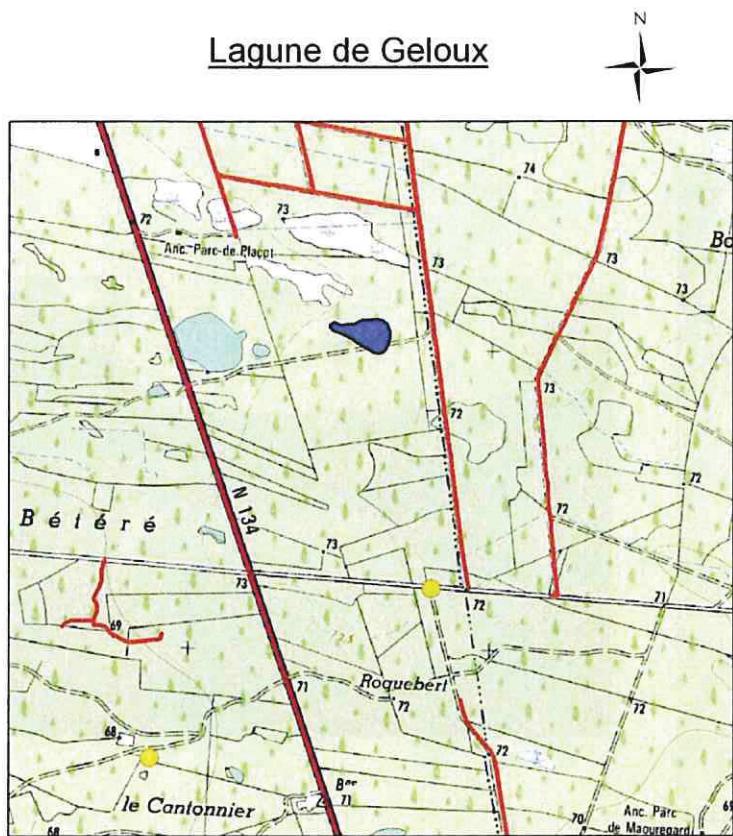
Légende

- SAUG07
- Forage DFCI
- Fossés
- Autres lagunes

0 0,25 0,5 1 Kilomètres



Illustration 74 : Illustrations relatives à la lagune SAUG07



Légende

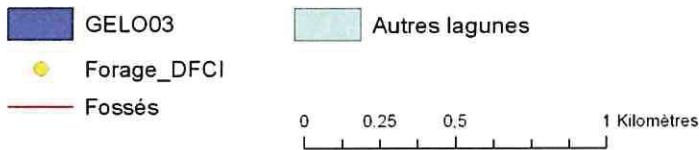


Illustration 75 : Illustrations relatives à la lagune GELO03

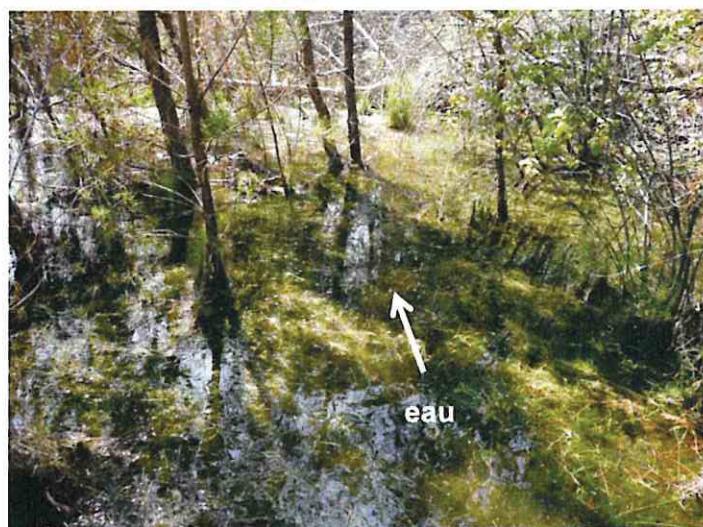
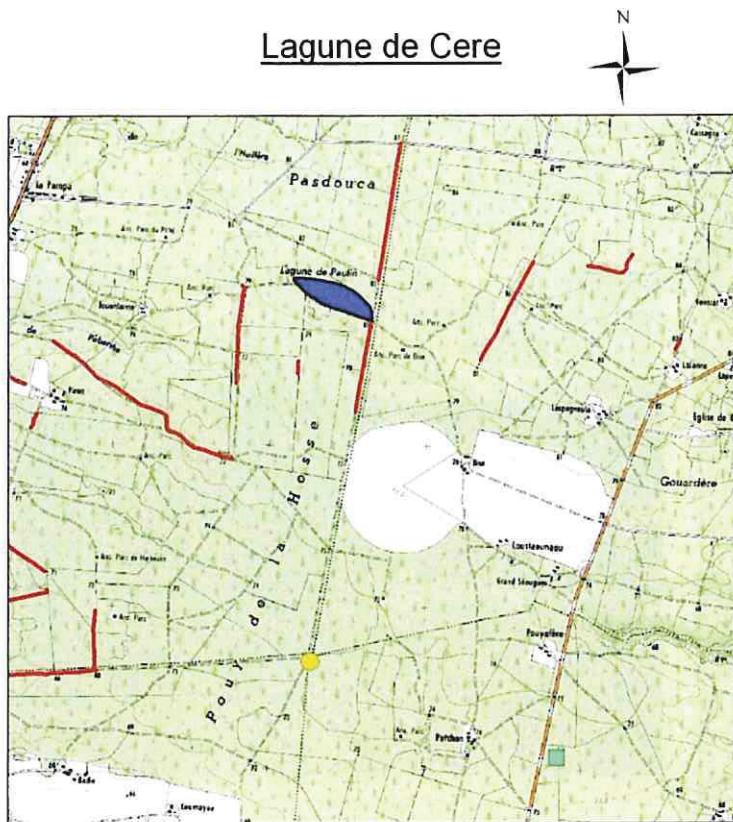
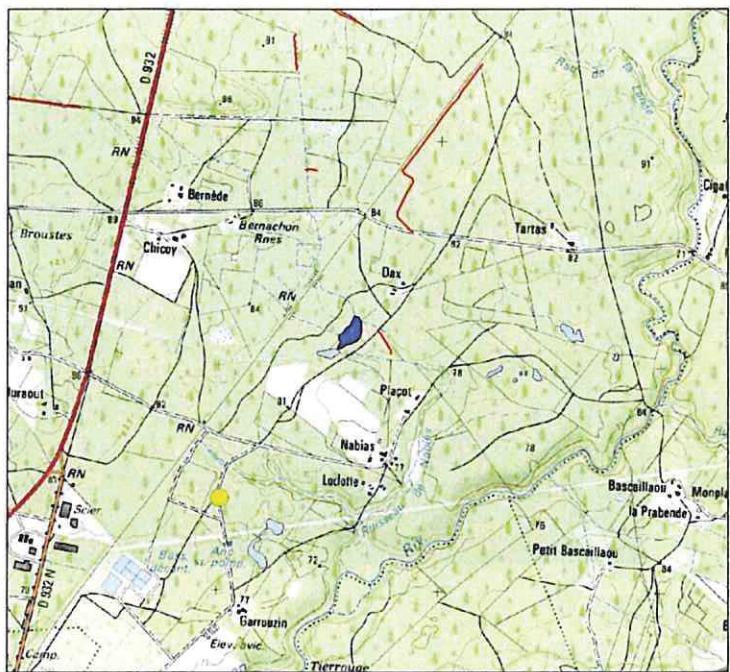


Illustration 76 : Illustrations relatives à la lagune CERE01

Lagune d'Arue



Légende

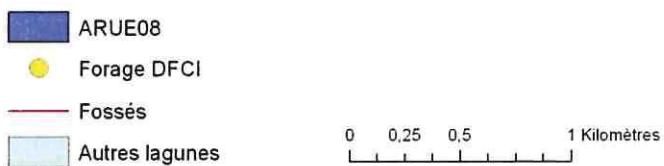


Illustration 77 : Illustrations relatives à la lagune ARUE08

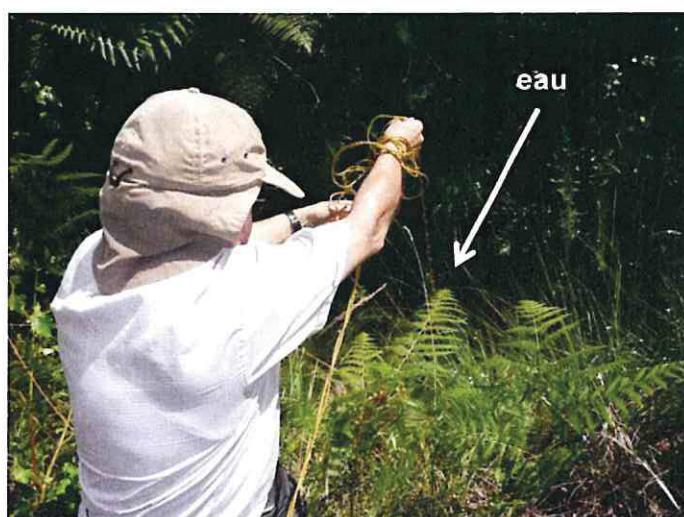
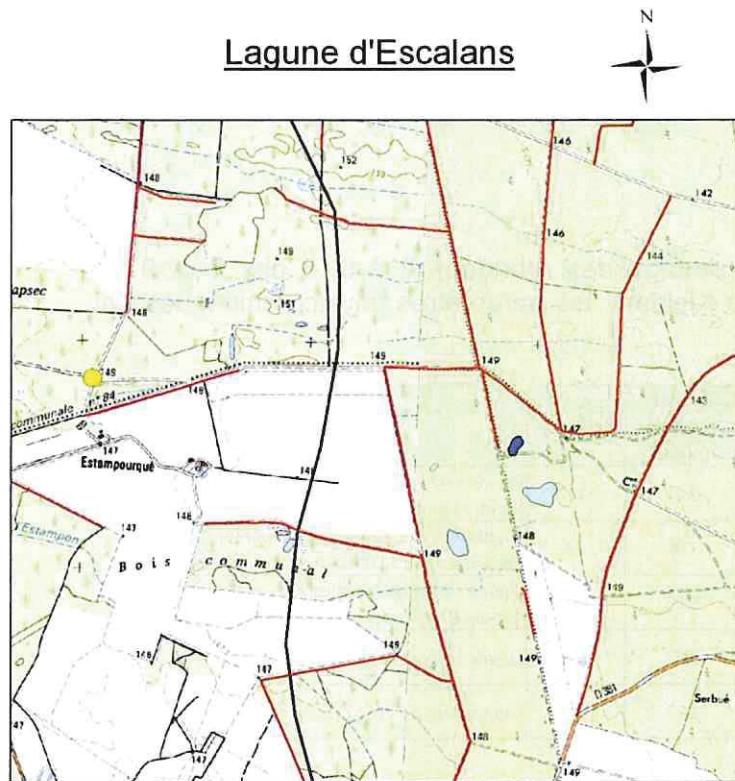


Illustration 78 : Illustrations relatives à la lagune ESCA02

9.1. ANALYSES D'EAU

Les prélèvements d'eau ont été effectués le 5 août 2014 en présence de 2 représentantes du Département des Landes.

9.1.1. Paramètres physico-chimiques

Préalablement à l'échantillonnage en vue du dosage des rubriques 2 à 6, 6 bis, 8 et 9 de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne¹ et de l'azote Kjeldahl, les paramètres physico-chimiques ont été mesurés (Illustration 79).

	Température eau (°C)	Conductivité à 25°C (µS/cm)	pH	Saturation oxygène (%)	Teneur oxygène (mg/l)	eH (mV)	Remarques
SAUG07	19,5	105,5	6,36	5,9	0,61	-117	lagune recreusée pour abreuvement animaux, toujours en eau
GELO03	22,8	80	4,8	7,6	0,6	22	végétation très abondante (molinie, sphagnes), encore en eau au 05/08 mais peut s'assécher
CERE01	21,1	87	5,38	64	5,93	115	lagune sèche depuis plusieurs années mais en eau depuis 2012, envahie par des pins
ARUE08	27,3	86	6,62	110	8,67	50	lagune recreusée, toujours en eau
ESCA02	21,4	216	6,8	120	10,2	80	lagune sèche au 05/08 mais eau dans fossé bordier

Illustration 79 : Récapitulatif des paramètres physico-chimiques mesurés sur les 5 sites

Dans l'ensemble, les échantillons ont présenté des températures assez élevées (en lien avec les températures extérieures), de faibles conductivités traduisant une faible minéralisation et des pH acides, typiques des milieux sableux.

Par ailleurs, les échantillons ont présenté des teneurs en oxygène très variables, les plus faibles teneurs pouvant traduire une pollution (lorsque des matières organiques ou minérales ont été oxydées) ou un faible taux d'activité biologique (activité photosynthétique ou respiratoire des organismes aquatiques limitée).

Enfin, à l'exception de la lagune de Saugnacq-et-Muret dont l'eau semblait non renouvelée, les mesures de eH (potentiel redox) ont mis en évidence des milieux plus ou moins oxygénés.

9.1.2. Comparaison avec les résultats obtenus sur les territoires des SAGE Born-et-Buch, Leyre et Midouze

Les valeurs mesurées au droit des 5 lagunes le 5 août 2014 ont été comparées aux paramètres physico-chimiques mesurés sur les territoires des SAGE « Ciron », « Midouze », « Leyre » et « Born-et-Buch » dans le cadre du module 6 de la convention « Eaux souterraines » :

- Ciron : mesures effectuées du 09/07/14 au 28/07/14,
- Midouze : mesures effectuées du 16/07/13 au 07/08/13,
- Leyre : mesures effectuées du 11/08/10 au 18/08/10,
- Born-et-Buch : mesures effectuées du 01/06/10 au 10/06/10.

¹ Ces rubriques correspondent aux ions majeurs, aux matières organiques oxydables, aux matières en suspension, aux paramètres de la minéralisation, aux composés azotés et phosphorés, aux micropolluants minéraux, aux pesticides et aux COV (composés organo-halogénés volatils).

L'illustration 80 relative aux températures montre que les valeurs mesurées au droit des lagunes sont nettement supérieures aux valeurs mesurées sur les territoires des différents SAGE. L'origine de ces différences est liée à la nature des échantillons qui correspondaient à des eaux souterraines sur les SAGE et des eaux superficielles en équilibre avec les températures atmosphériques sur les lagunes.

L'illustration 81 relative aux conductivités à 25 °C montre que les valeurs mesurées au droit des lagunes concordent avec les valeurs mesurées sur les territoires des différents SAGE : les 2 forages les plus proches de la lagune de Saugnacq (105,5 µS/cm) présentent des conductivités de 106 et 109 µS/cm, les 5 ouvrages les plus proches des lagunes de Geloux (80 µS/cm) et Cere (87 µS/cm) présentent des conductivités respectives de 76, 78, 87, 95 et 98 µS/cm, l'ouvrage situé à proximité de la lagune de Arue (86 µS/cm) présente une conductivité de 74 µS/cm et l'ouvrage le plus proche de la lagune d'Escalans (216 µS/cm) présente une conductivité de 268 µS/cm. Cette observation tend à confirmer qu'il existe d'étroites relations entre les lagunes et la nappe superficielle.

L'illustration 82 relative aux pH montre aussi une bonne corrélation entre les valeurs mesurées au droit des lagunes et sur les territoires des différents SAGE.

Dans l'ensemble, la comparaison des paramètres physico-chimiques met en évidence une très bonne correspondance et laisse donc supposer que la nappe superficielle contribue à alimenter les lagunes.

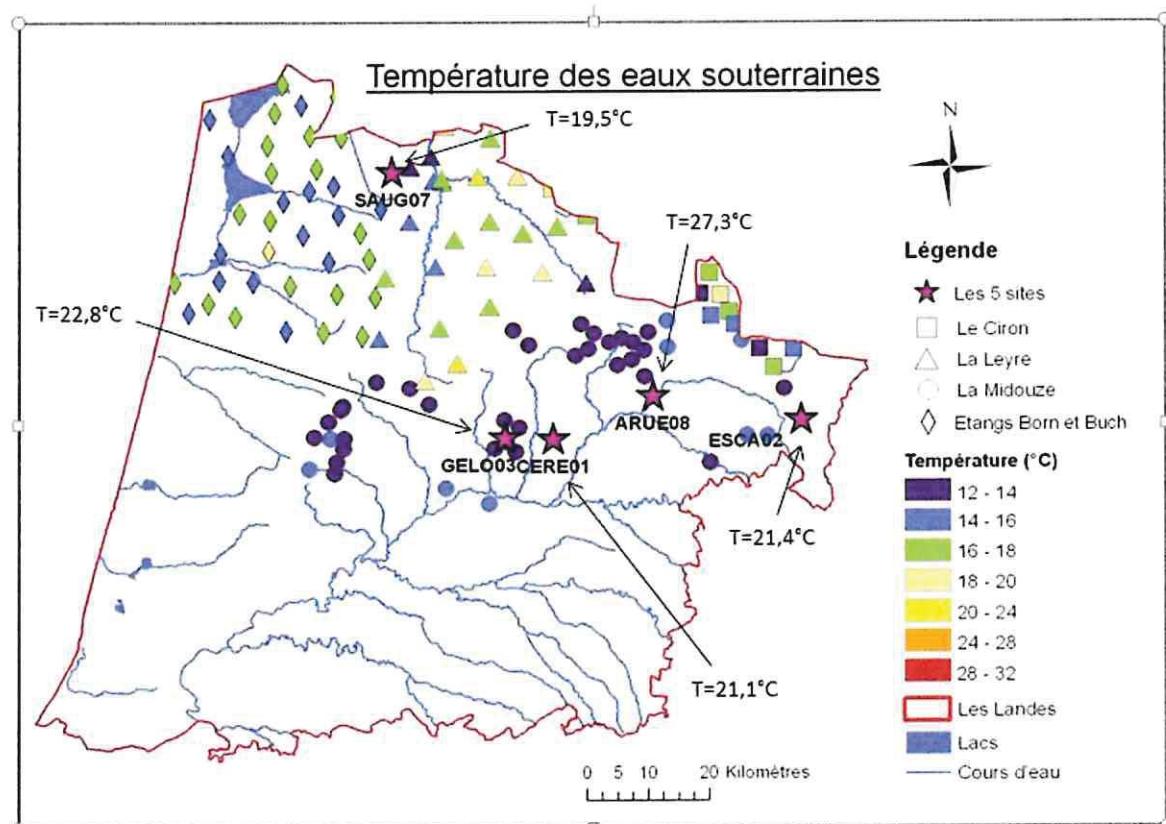


Illustration 80 : Températures observées au droit des différents SAGE et des lagunes

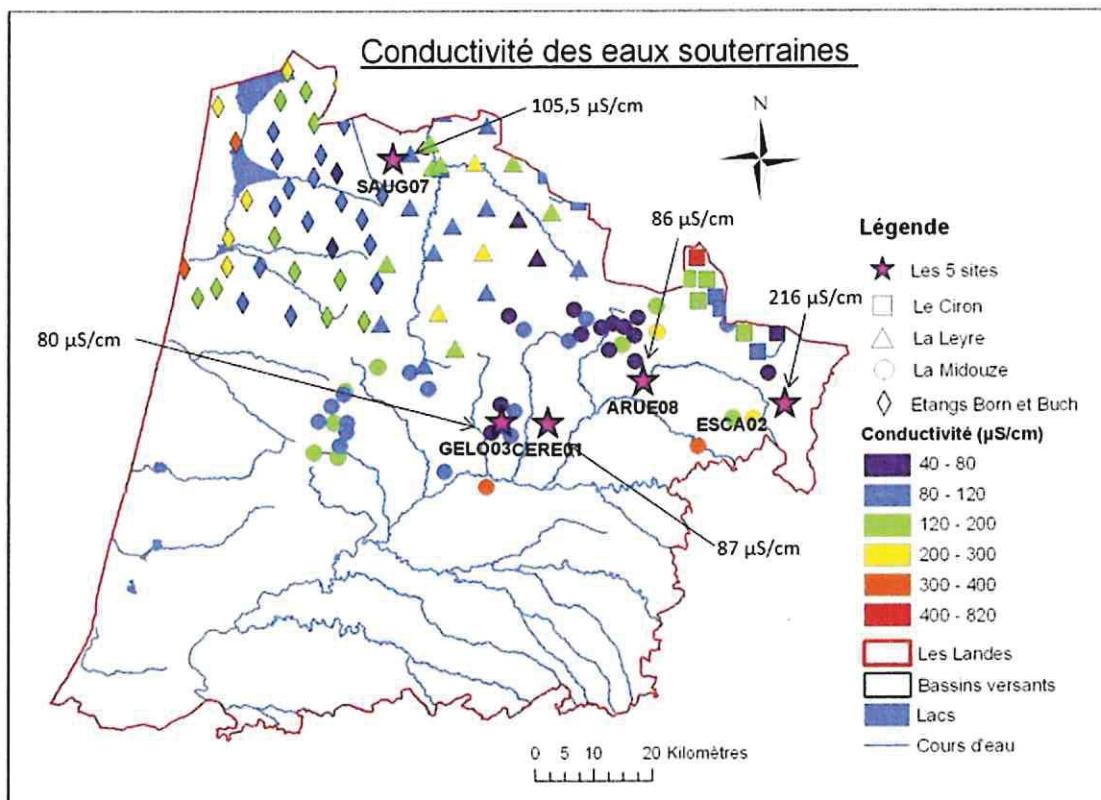


Illustration 81 : Conductivités observées au droit des différents SAGE et des lagunes

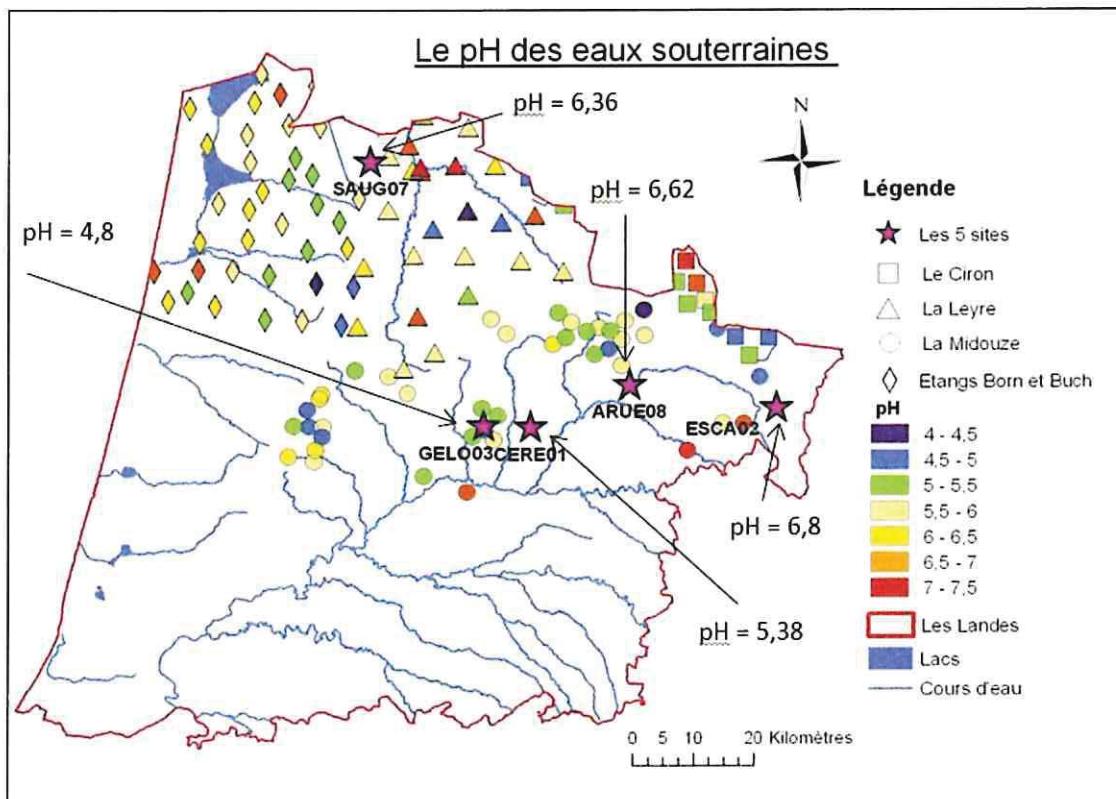


Illustration 82 : pH observés au droit des différents SAGE et des lagunes

9.1.3. Analyses complètes

Les échantillons prélevés au droit des 5 lagunes ont fait l'objet d'analyses similaires à celles qui sont réalisées sur les points d'eau appartenant au réseau de suivi patrimonial du bassin Adour-Garonne. Les paramètres analysés s'ordonnent sous forme de rubriques établies par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et dites « AEAG ».

Les analyses ont été réalisées au LDE31 (laboratoire départemental de Haute-Garonne) et les résultats reportés dans le tableau de l'Illustration 83.

Afin d'évaluer la qualité des eaux, les limites de qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine ont été mentionnées dans la dernière colonne du tableau et les dépassements de ces normes, surlignés en rouge dans les 5 premières colonnes.

	GELOUX 03	CERE 01	ESCALANS 02	SAUGNACQ 07	ARUE 08	Unité	Limites de qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine (arrêté du 11/01/07)
Date prélèvement	05/08/2014	05/08/2014	05/08/2014	05/08/2014	05/08/2014		
Rubrique 2 AEAG							
Calcium	3,7	2,1	15	2	4,2	mg/l	
Carbonate	<1	<1	<1	<1	<1	mg/l CO3	
Chlorures	14	18	17	15	14	mg/l	200
Hydrogénocarbonates	12,2	7,3	17,1	15,9	6,1	mg/l HCO3	
Magnésium	1,1	1	5,9	1,2	1	mg/l	
Potassium	4,2	5	8,3	2,6	0,9	mg/l	
Sodium	6,7	7,6	7	10	8	mg/l	200
Sulfates	<1	<1	23	1	9	mg/l	250
Rubrique 3 AEAG							
Carbone Organique Dissous	55	21	8	15	7,4	mg/l	
Oxydabilité KMnO4	200	35	5,3	45	5,2	mg/l O2	10000
Rubrique 4 AEAG							
Fer dissous	6670	68	44	1010	31	µg/l Fe	
Manganèse dissous	69	78	2	7	2	µg/l Mn	
Turbidité	320	18	8,4	110	9,5	NFU	
Fer total	17800	614	71	19900	334	µg/l Fe	
Manganèse total	119	103	2	11	4	µg/l Mn	
Rubrique 5 AEAG							
Titre alcalin	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	°F	
Titre alcalin complet	1	0,6	1,4	1,3	0,5	°F	
Titre hydrotimétrique	1,4	0,9	6,2	1	1,5	°F	
Fluorures	0,29	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	mg/l	
Silicate	4,1	<0,4	3,8	3,4	3,5	mg/l SiO2	
Rubrique 6 AEAG							
Ammonium	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	mg/l NH4	4
Nitrates	<1	<1	31	<1	<1	mg/l NO3	50
Nitrites	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	mg/l NO2	
Azote Kjeldhal	33	3,3	1,3	4,7	0,8	mg/l	1
Rubrique 6 bis AEAG							
Orthophosphates	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	mg/l PO4	
Phosphore total	0,13	0,12	<0,05	0,07	<0,05	mg/l P	5
Rubrique 8 AEAG							
Métaazachlore OXA			5,4			µg/l	2 par substance, 5 pour le total
Métolachlore ESA			12			µg/l	2 par substance, 5 pour le total
Métolachlore OXA			5,4			µg/l	2 par substance, 5 pour le total
Rubrique 9 AEAG							
Chloroforme				0,31		µg/l	

Illustration 83 : Résultats des analyses complètes réalisées sur les 5 lagunes (seuls les micro-polluants quantifiés des rubriques 8 et 9 ont été mentionnés)

Il apparaît qu'à l'exception de l'azote Kjeldhal pour 4 lagunes sur 5 et de 3 pesticides pour la lagune d'Escalans, les teneurs dosées sont conformes aux limites de qualité des eaux brutes destinées à la consommation humaine.

L'azote Kjeldhal correspond aux fractions organique et ammoniacale de l'azote (nitrates et nitrites exclus). Les fortes teneurs (jusqu'à 33 mg/l à Geloux) indiquent la présence d'un fort taux de matière organique dans les échantillons et sont bien corrélées à d'autres indicateurs comme le COD (carbone organique dissous) et l'oxydabilité au KMnO₄.

Les fortes teneurs en pesticides détectées à Escalans sont, quant à elles, liées à l'activité agricole environnante. En l'absence d'eau au droit de la lagune, l'échantillon a été prélevé dans un fossé proche qui draine une parcelle plantée de maïs. Les 3 molécules quantifiées correspondent à des métabolites (produits de dégradation) du métazachlore et du métolachlore (pesticides de type herbicides). L'origine agricole de ces molécules est confortée par le dosage simultané d'une forte teneur en nitrates (31 mg/l).

On notera enfin que 2 des lagunes se caractérisent par de très fortes teneurs en fer dissous et fer total : Geloux et Saugnacq.

La présence de fer à forte teneur dans les eaux peut contribuer à la formation d'alias qui correspond à une roche typique des Landes de Gascogne résultant de la cimentation des grains de sable et graviers par des hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse et par de la matière organique sous l'effet de la percolation des eaux de pluie et du battement de la nappe. La « garluche » correspond à son état évolué. Il s'agit alors d'un mineraï de fer qui a longtemps servi de matière première à l'industrie du fer ou pour la construction de bâtiments (Illustration 84).



Illustration 84 : Photos de garluche (à l'état naturel à gauche et prise dans du ciment à droite)

Sur la base des 5 échantillons prélevés et analysés, il apparaît que l'eau des lagunes landaises se caractérise par de fortes teneurs en matière organique et en fer. Une contamination par des nitrates et des pesticides est de plus possible lorsque la lagune se situe à proximité ou à l'aval hydraulique d'une parcelle agricole.

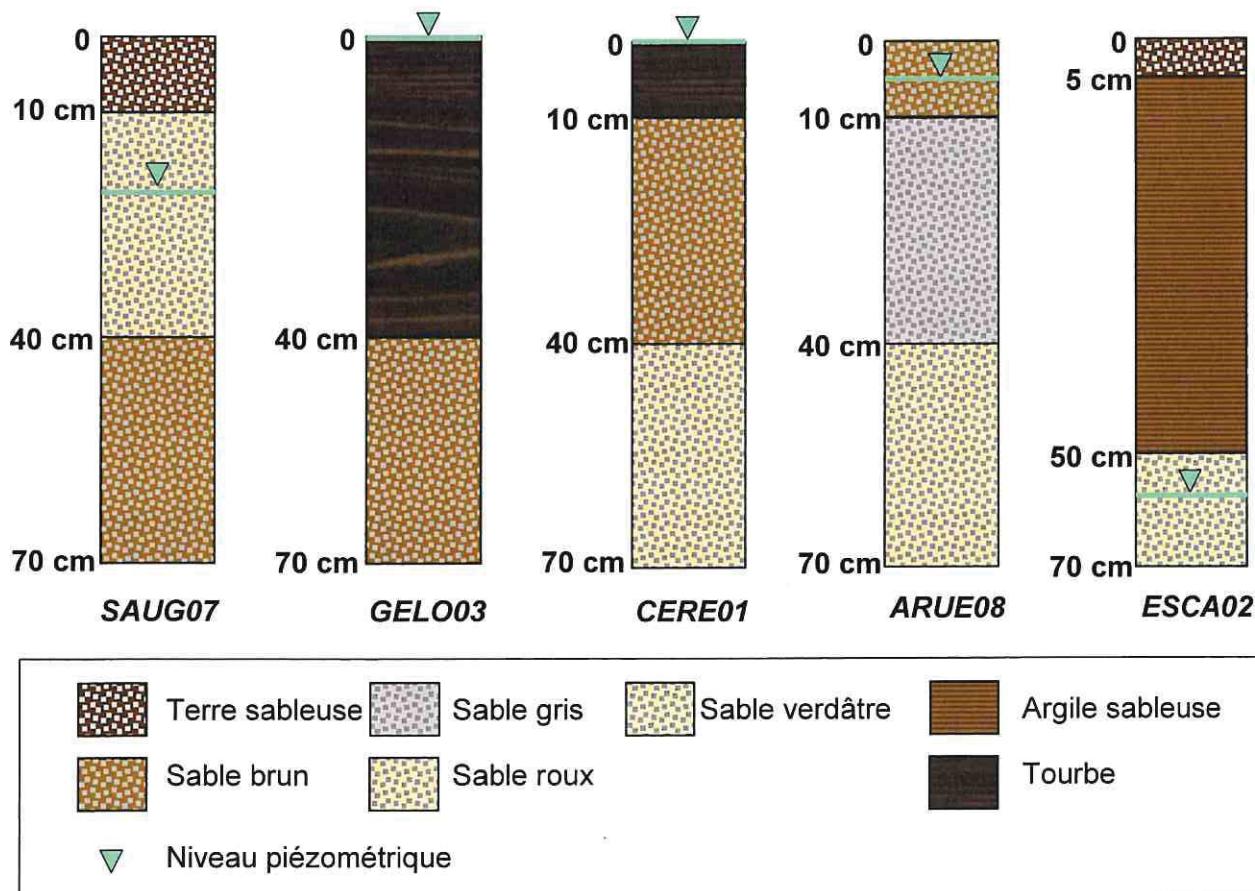
9.2. ANALYSES DE SOLS

Les prélèvements de sols ont été effectués simultanément aux prélèvements d'eau et envoyés au laboratoire d'analyses du BRGM, situé à Orléans.

Ils ont été réalisés au moyen d'une tarière à main jusqu'à une profondeur de 70 cm sur les 5 sites.

9.2.1. Observations de terrain

L'illustration suivante permet de comparer les différents profils mis en évidence et de visualiser les niveaux piézométriques (repères verts).



L'examen détaillé des cuttings a montré que les sols étaient dans tous les cas constitués de sables éoliens. Il s'agit de grains ronds et mats usés transportés par le vent (Illustration 86).

Il est couramment admis que ces sables éoliens recouvrent une grande partie du département des Landes même s'ils ne sont pas toujours cartographiés. De façon statistique, ils présentent une granulométrie d'autant plus fine que l'on se déplace vers l'est.

A Saugnacq-et-Muret (SAUG07), la superposition observée de sables riches en matière organique, de sables roux propres et de sables plus foncés laisse supposer au moins 2 phases de dépôt. Le premier horizon pourrait correspondre aux dépôts actuels de la lagune (prélèvement réalisé dans une zone exondée en été et en eau le reste du temps). La limite entre les sables roux et les sables plus foncés à 40 cm de profondeur pourrait, quant à elle, correspondre à un paléosol.

A Geloux (GELO03), les 40 premiers centimètres de sol sont constitués de tourbe formée par le dépôt de matière organique au fond de la lagune (particulièrement riche en sphaignes et molinie). La partie sous-jacente sableuse présente, quant à elle, une proportion de grains ronds et mats moins importante qu'à Saugnacq-et-Muret. L'examen des cuttings a en effet révélé la présence de 10 à 20 % de grains brillants qui pourrait traduire une distance de transport entre la source de la matière et le site de dépôt moins importante qu'à Saugnacq-et-Muret.

A Cere (CERE01), on retrouve une dizaine de centimes de tourbe surmontant 30 cm de sables bruns fins puis 30 cm de sables roux plus grossiers. Comme à Geloux, la présence de tourbe pourrait témoigner d'un environnement non remanié.

A Arue (ARUE08), lagune située dans la partie orientale des Landes, on retrouve logiquement des sables roux très fins ainsi que des éléments plus grossiers dont l'origine est certainement plus locale.

A Escalans (ESCA02), l'argile sableuse que l'on retrouve sur une épaisseur de 50 cm environ pourrait elle aussi être d'origine éolienne. La cartographie établie par Sitzia en 2014 (Illustration 87) montre en effet que des limons ont été transportés sur des dizaines de km par les vents puissants d'ouest du Quaternaire avant de se déposer à l'est du département des Landes. La couleur verdâtre observée au niveau des sables sous-jacents pourrait traduire les conditions réductrices auxquelles ils ont été soumis de ce confinement.

De façon globale, les prélèvements de terrain n'ont pas permis d'identifier les formations qui constituent le substratum des lagunes (Illustration 88) en raison de la présence de placages éoliens sur une épaisseur d'au moins 70 cm.

En ce qui concerne les niveaux piézométriques, ils ont été rencontrés entre 0 et 55 cm de profondeur avec une valeur maximale observée au droit de la lagune asséchée d'Escalans.

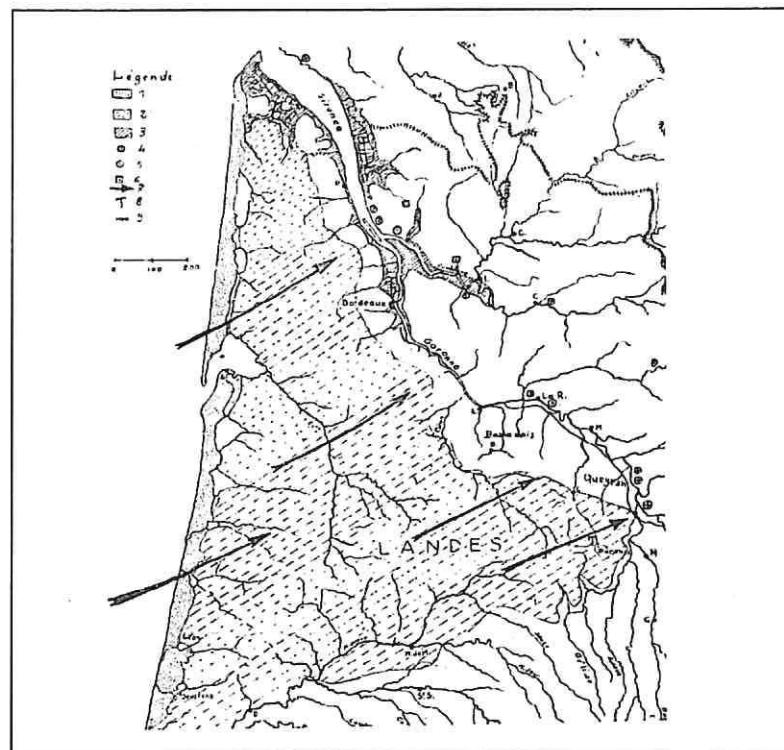


Illustration 86 : Carte de répartition des sables éoliens, limons et loess aquitains (d'après Sitzia, 2014)

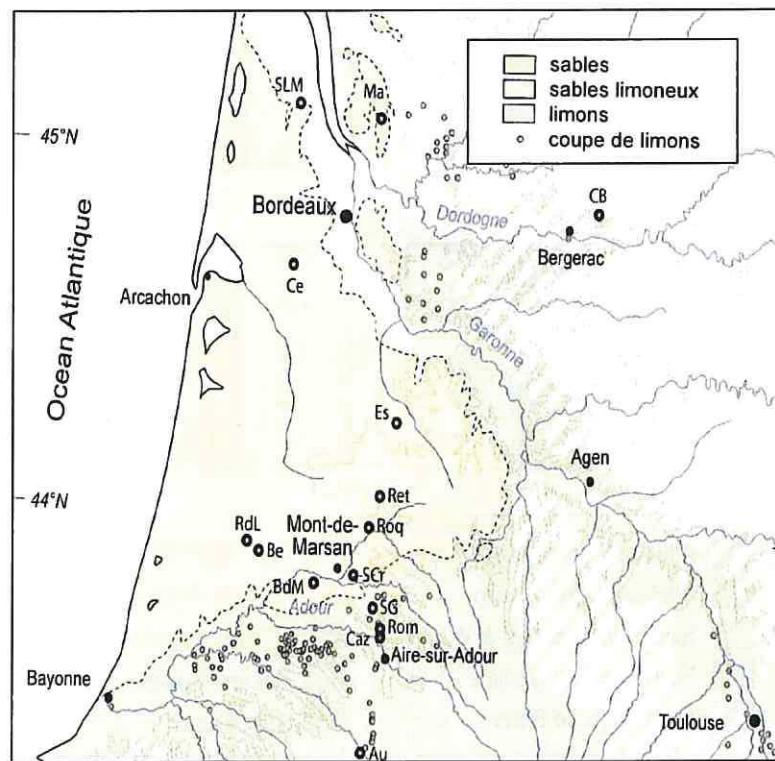


Illustration 87 : Carte des dépôts éoliens du Bassin Aquitain (d'après Sitzia, 2014)

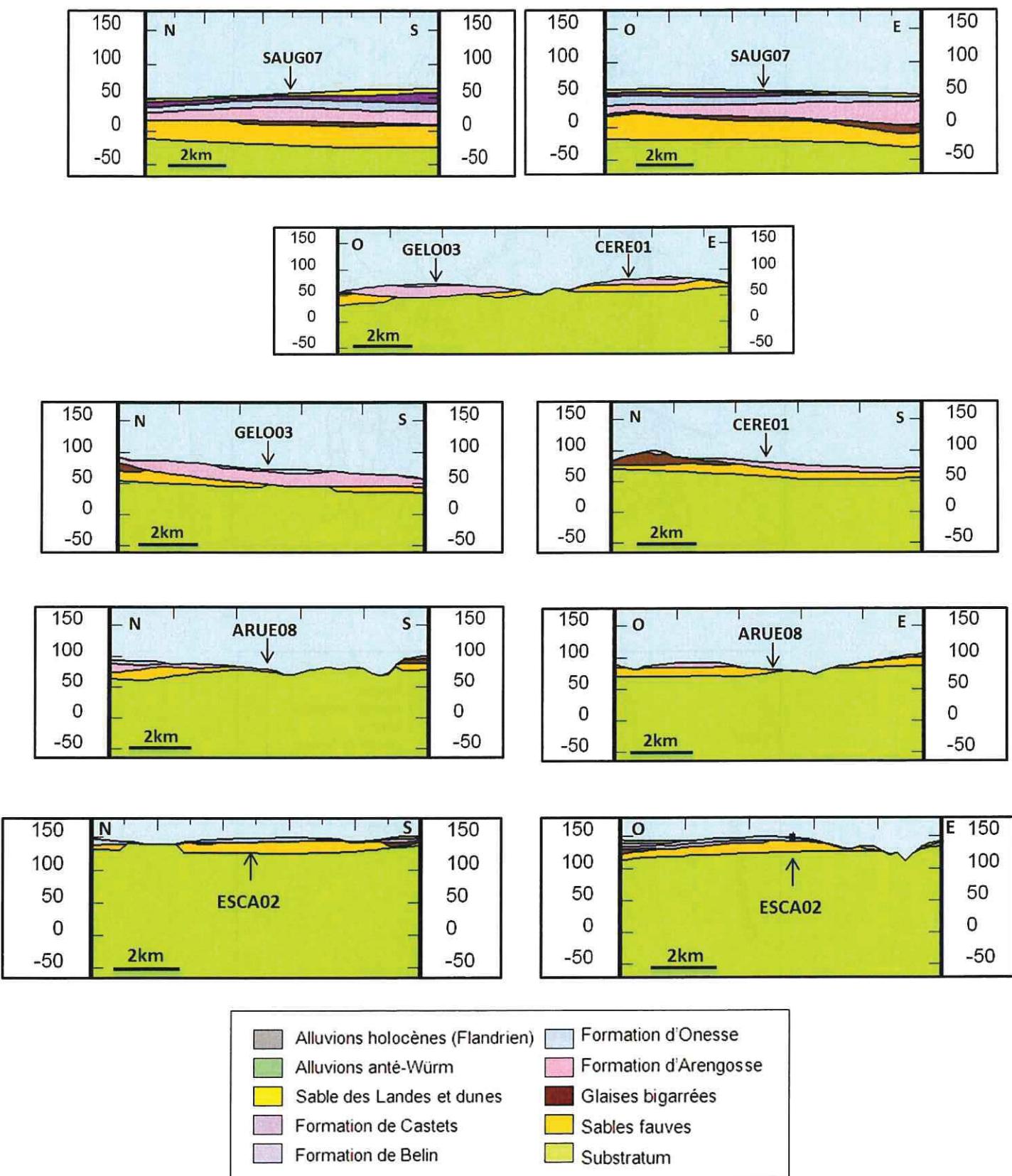


Illustration 88 : Coupes géologiques réalisées au droit des lagunes

9.2.2. Analyses réalisées en laboratoire

Les analyses réalisées en laboratoire ont consisté en une détermination du pH du sol, de sa teneur en matière organique et de sa composition minéralogique. Les résultats ont été reportés dans le tableau de l'Illustration 89.

Il apparaît que le pourcentage de matière organique varie de 0,22 à 7,84 %, le sol de la lagune de Geloux étant le plus riche et celui d'Arue, le plus pauvre. Dans ces conditions, il est possible de mentionner une bonne correspondance des teneurs en matière organique des sols et de l'eau. La lagune de Geloux est en effet celle qui présentait le plus fort taux d'azote Kjeldhal, de COD et d'oxydabilité au KMnO₄ et celle d'Arue, les plus faibles taux.

Le pH varie quant à lui de 4,2 à 5,9, témoignant de l'acidité des sols sableux. Dans tous les cas, les mesures réalisées sur les échantillons d'eau ont mis en évidence des valeurs plus élevées mais inférieures à 7.

En ce qui concerne la composition minéralogique, l'analyse des sols par diffractométrie X a mis logiquement en évidence la présence de quartz en abondance sur les 5 échantillons.

Les analyses ont aussi révélé la présence de **traces** de feldspaths potassiques (orthose ou microcline) sur tous les échantillons ainsi que des traces de feldspaths calco-sodiques (= plagioclases) sur 2 échantillons (l'albite correspond à un feldspath sodique).

La présence de ces éléments témoigne de la coexistence de dépôts éoliens et de dépôts typiquement détritiques dans l'environnement des lagunes.

Elle témoigne aussi de grandes distances de transport entre le lieu de génèse des roches cristallines dont ils sont issus (Massif Central ou plus probablement Pyrénées) et les différentes lagunes.

Lagune	GELOUX 03	CERE 01	ESCALANS 02
Date prélèvement	05/08/2014	05/08/2014	05/08/2014
Matière organique totale	7,84%	5,34%	4,09%
pH sol	4,4	4,2	4,7
Diffractométrie rayons X	quartz en abondance orthose probable en traces plagioclase (albite sur le diffractogramme)	quartz en abondance microcline probable en traces	quartz en abondance microcline probable en traces plagioclase (albite sur le diffractogramme)
pH eau (pour mémoire)	4,8	5,38	6,8
Lagune	SAUGNACQ 07	ARUE 08	
Date prélèvement	05/08/2014	05/08/2014	
Matière organique totale	0,41%	0,22%	
pH sol	5,1	5,9	
Diffractométrie rayons X	quartz en abondance microcline probable en traces plagioclase (albite sur le diffractogramme)	quartz en abondance microcline probable en traces	
pH eau (pour mémoire)	6,36	6,62	

Illustration 89 : Résultats des analyses de sol

9.3. BILAN

Au terme des investigations menées sur les 5 lagunes, on retiendra :

- *qu'il existe une très bonne correspondance des paramètres physico-chimiques mesurés au droit de la nappe plio-quaternaire et des lagunes laissant supposer une bonne connexion entre les eaux souterraines et superficielles,*
- *que l'eau des lagunes se caractérise souvent par une forte teneur en matière organique et en fer avec une possible contamination par des nitrates et des pesticides dans un environnement agricole. Les lagunes doivent donc être considérées comme des milieux particulièrement vulnérables,*
- *que le niveau piézométrique le plus profond a été retrouvé à 55 cm de profondeur en août 2014 confortant l'hypothèse d'une participation très probable de la nappe superficielle à l'alimentation des lagunes en période de plus hautes eaux,*
- *que l'environnement pédologique des lagunes correspond à des sables éoliens essentiellement constitués de quartz.*

10. Instrumentation d'un site pilote

Au terme des investigations menées et conformément à la proposition technique du BRGM, un site pilote a été instrumenté. Il s'agit de la lagune de Paulin à Cere (CERE 01) (Illustration 90) dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau de l'Illustration 73.

Le choix s'est porté sur cette lagune en raison de ses dimensions (il s'agit de la plus grande lagune répertoriée par le Département), de son statut (propriétaires privés motivés pour participer à l'avancée des connaissances sur le fonctionnement des milieux lagunaires), de son caractère naturel (non modifié), de l'existence de données (relevés topographiques, description des habitats...) et surtout de l'existence d'un programme de gestion pour la période 2013-2017.

Ce programme prévoit en particulier la réalisation de travaux (coupe de pins et de bourdaines colonisant l'intérieur de la lagune), la pose et le suivi de piézomètres peu profonds (2 m environ) et différents relevés de végétation et d'espèces animales patrimoniales.

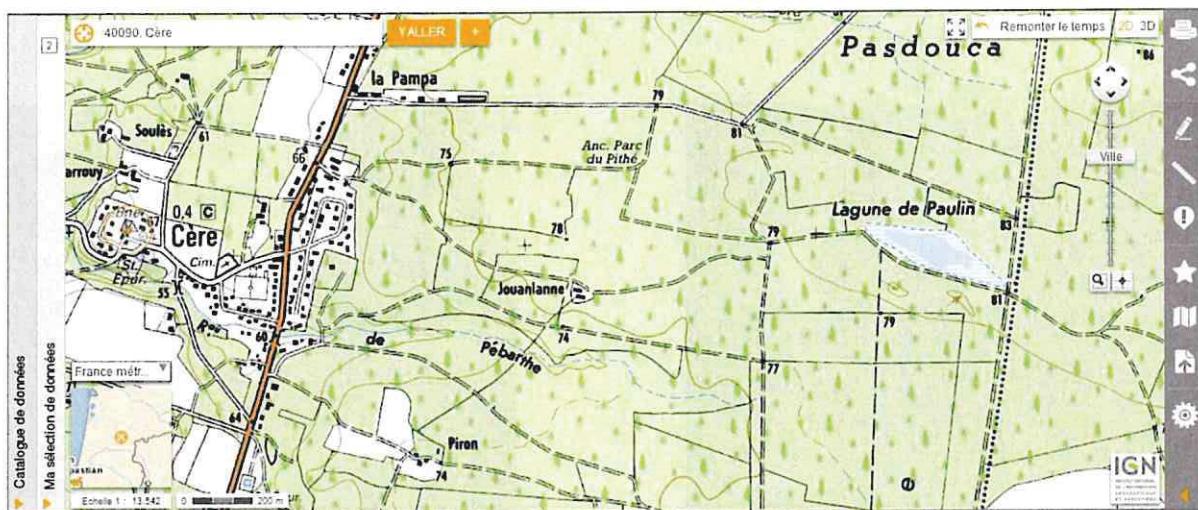


Illustration 90 : Localisation de la lagune de Paulin à Cere d'après Géoportail

Les 3 piézomètres de 10 m prévus dans le cadre de l'étude BRGM ont été implantés le 20/11/14 en présence de Valérie Guéguen et Fabrice Crabos du Département, d'un représentant de l'entreprise Roquebert choisie pour réaliser les travaux et de Daniel Destarac et Christophe Mouchez, représentants des propriétaires (Alliance Forêts-Bois et Forestière de Gascogne).

Les 3 piézomètres ont été implantés selon le schéma suivant (Illustration 91). Ils complèteront les dispositifs peu profonds (piézomètres de 2 m environ) que le Conseil Départemental souhaite planter au sein même de la lagune.

Les travaux ont finalement été réalisés par l'entreprise Roquebert implantée à Labouheyre (40) du 1 au 3 décembre 2014. Les 3 piézomètres ont été réalisés au battage (ϕ 273 mm) (Illustration 92). L'Illustration 93 récapitule leurs principales caractéristiques. L'Illustration 94 permet, quant à elle, de visualiser la succession des terrains rencontrés (sables éoliens + terre végétale surmontant le terrain en place dans les 3 cas).

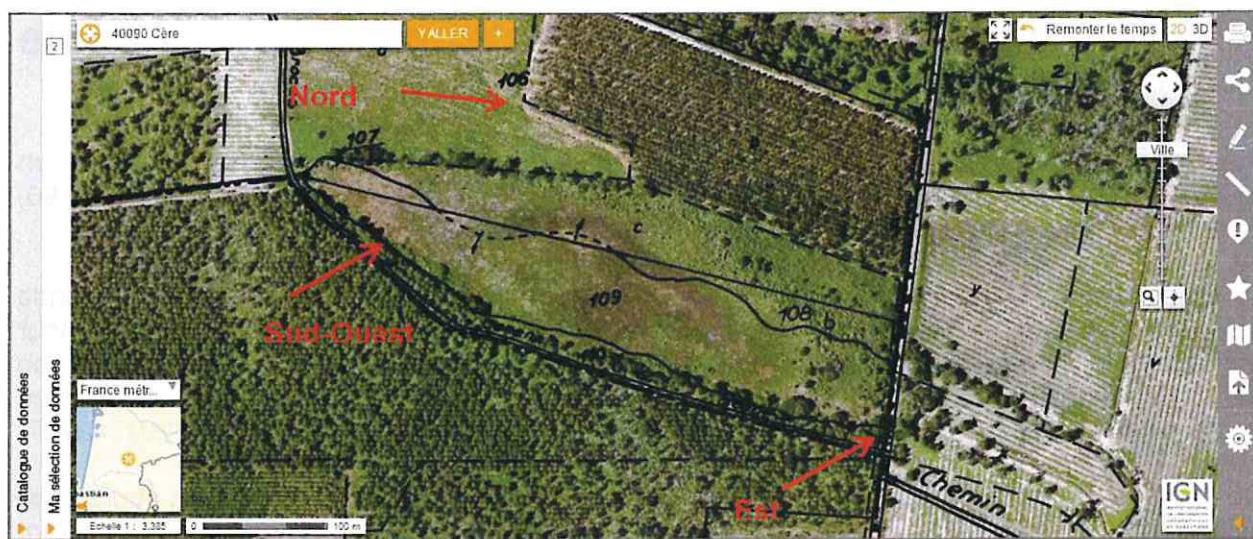


Illustration 91 : Localisation des piézomètres sur fond cadastral d'après Géoportail



Illustration 92 : Réalisation des 3 piézomètres du 1 au 3 décembre 2014

Numéro BSS	Date réalisation	Situation	Prof. (m)	X (WGS84)	Y (WGS84)	Niveau statique/sol	Débit	Profondeur	Géologie	Formations	Equipement (tubage PVC 125/115) / sol
09257XD109FEST	01/12/2014	Forage Est	11	-0,49874	43,99068	- 3,1 m	4,5 m3/h	0 à 0,5 m	terre végétale et sable éolian noir riche en matière organique	de 0,5 à 11 : Fmt d'Arengosse, Pliocène	tube plein sur 6 m puis tube crépiné sur 4,5 m puis tube décanteur sur 0,5 m
								0,5 à 3 m	sable noir fluviatile riche en matière organique		
								3 à 4 m	sable marron fluviatile		
								4 à 10 m	sable grossier fluviatile blanc gris		
								10 à 11 m	argile sableuse gris clair		
09257XD110FNORD	02/12/2014	Forage Nord	8,7	-0,50222	43,99322	- 3,4 m	4,5 m3/h	0 à 0,5 m	terre végétale et sable éolian noir riche en matière organique	de 0,5 à 8,3 : Fmt d'Arengosse, Pliocène puis de 8,3-8,7 : Glaises Bigarées (Tortonien, Miocène)	tube plein sur 3,7 m puis tube crépiné sur 4,5 m puis tube décanteur sur 0,5 m
								0,5 à 3 m	sable marron grossier fluviatile à traces d'induration (battement de la nappe)		
								3 à 5 m	sable blanc gris fluviatile à lits d'argile		
								5 à 8,3 m	sable grossier blanc gris à micro-galets de quartz blanc laiteux à gris bleuté (5 mm) (+ grossiers à la base)		
								8,3 à 8,7 m	argiles sableuses plastiques bigarrées (ocre jaune à rouge)		
09257XD111FSW	02/12/14 et 03/12/14	Forage SW	10	-0,50391	43,99208	- 3,1 m	4,5 m3/h	0 à 0,5 m	terre végétale et sable grossier noir très riche en matière organique	de 0,5 à 10 m : Fmt d'Arengosse, Pliocène	tube plein sur 5 m puis tube crépiné sur 4,5 m puis tube décanteur sur 0,5 m
								0,5 à 1,8 m	sable marron grossier fluviatile à traces d'induration (battement de la nappe) (moins de matière organique à la base)		
								1,8 à 5,5 m	sable blanc gris grossier fluviatile à lits d'argile sableuse fine gris vert clair et marron au sommet (odeur H2S lors de la traversée du niveau)		
								5,5 à 10 m	sable grossier blanc gris à micro-galets avec intercalations d'argile grise		

Illustration 93 : Caractéristiques des ouvrages

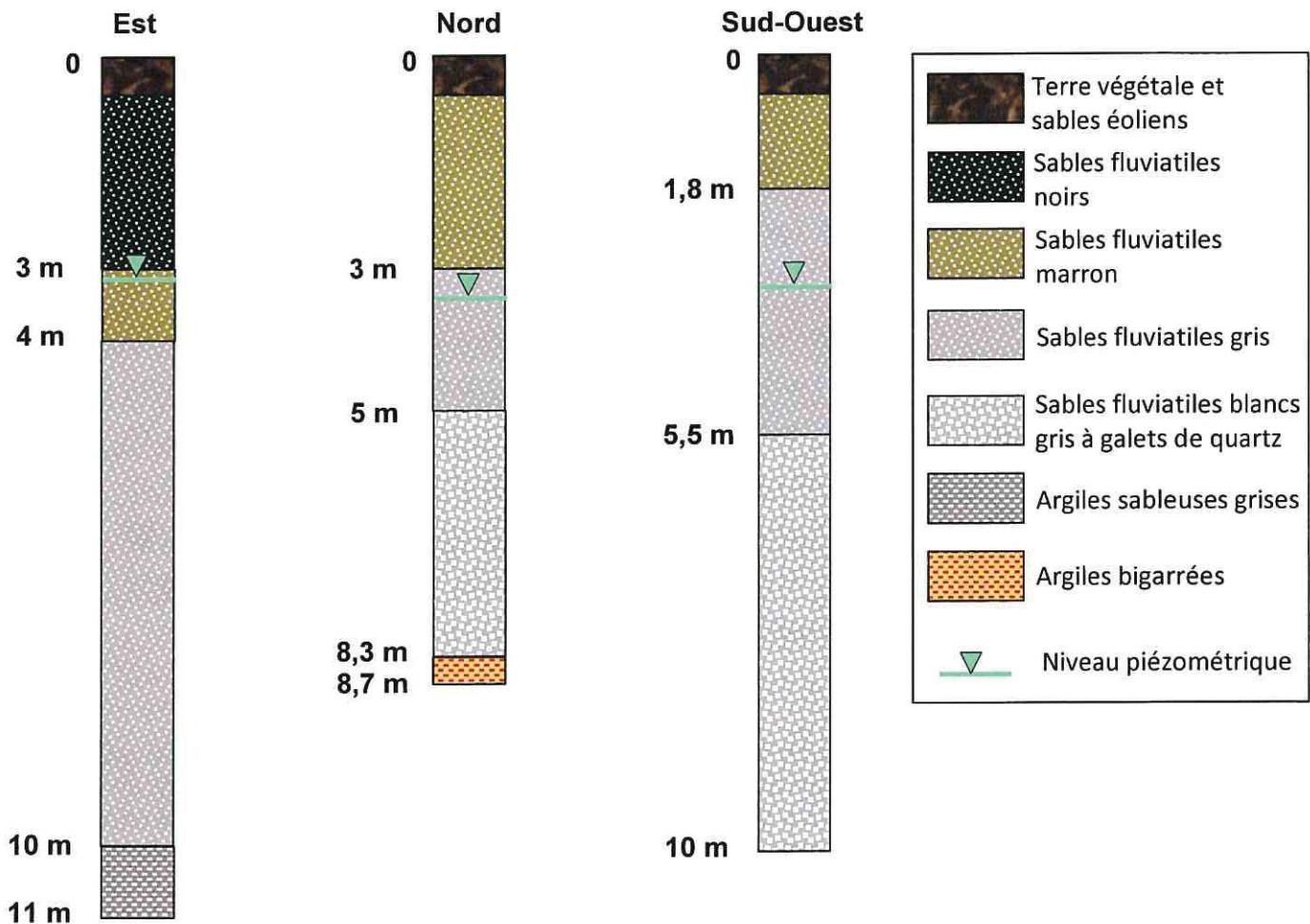


Illustration 94 : Succession des terrains rencontrés dans les 3 piézomètres

Quelques semaines après, ces ouvrages ainsi que les 2 piézomètres posés par le Département au sein même de la lagune (PZ 4 et PZ5) ont été nivelés par le cabinet AMIGE de Saint-Sever (40). Pour les 3 premiers ouvrages, le repère nivelé correspond au sommet du tubage PVC, pour les 2 derniers, au sommet du tubage interne (Illustration 95). Les résultats obtenus ont été consignés dans le tableau de l'Illustration 96.



Illustration 95 : Localisation des points nivelés et repères retenus

	X (m) L93	Y (m) L93	Z (m) L93
PZ1 (Est)	1 419 442	3 204 914	81,89
PZ2 (Sud-Ouest)	1 419 042	3 205 088	82,10
PZ3 (Nord)	1 419 176	3 205 209	82,45
PZ4 (intra lagune)	1 419 381	3 204 966	80,97
PZ5 (intra lagune)	1 419 006	3 205 143	80,59

Illustration 96 : Coordonnées des ouvrages

En complément des mesures que le Département compte réaliser de façon hebdomadaire sur ces 5 ouvrages, le BRGM recommande l'installation d'un dispositif d'enregistrement en continu des niveaux sur au moins un des piézomètres de façon à pouvoir reconstituer des chroniques précises sur les 4 autres ouvrages.

Mené sur au moins 2 cycles hydrologiques, ce suivi ainsi que la prise en compte des précipitations devrait permettre à court terme de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de la lagune.

11. Conclusion

Les investigations réalisées dans le cadre de cette étude ont permis de mieux caractériser les lagunes landaises et d'identifier les causes probables de leur disparition progressive observée lors des 30 dernières années (- 53 % entre 1983 et 1994 et - 28% entre 1994 et 2005-2008).

Parmi les 3 mécanismes qui peuvent être à l'**origine des lagunes landaises**, l'origine périglaciaire ou thermokarstique est la moins probable (absence d'un pergélisol continu, datations de tourbe qui ont mis en évidence des âges plus récents que la fin de la dernière glaciation...). Si l'origine karstique est retenue par certains auteurs, les derniers travaux universitaires plébiscitent plutôt l'origine éolienne.

En ce qui concerne les **critères morphologiques**, on retiendra que la plupart des lagunes landaises se situent dans des secteurs d'altitudes supérieures à 60 m, dans des environnements plats (pente < 1 %), au droit des bassins versants de la Leyre ou de la Midouze et plutôt en amont ou dans la zone médiane des bassins versants sur lesquels elles se trouvent.

En ce qui concerne les critères **pédologiques**, les prélèvements effectués ont montré que les sols étaient constitués de sables éoliens (essentiellement constitués de quartz) pouvant contenir des traces de feldspaths issus du démantèlement de roches cristallines. Cette présence témoigne de la nature détritique des dépôts sous-jacents et de grandes distances de transport entre le lieu de génèse de ces roches (Pyrénées et/ou Massif Central) et leur lieu de sédimentation.

D'un point de vue **géologique**, la plupart des lagunes se situent dans un environnement où l'épaisseur des formations plio-quaternaires est comprise entre 0 et 40 m. 42 % d'entre elles sont implantées dans le sable des Landes, 31 % dans les sables d'Onesse et 8 % dans les sables d'Arengosse. Enfin, près de la moitié des lagunes se situent dans un environnement où le substratum est constitué par les glaises bigarrées du Miocène.

D'un point de vue **hydrogéologique**, les investigations menées sur 5 lagunes jugées représentatives ont montré qu'il existait une très bonne correspondance des paramètres physico-chimiques mesurés au droit de la nappe plio-quaternaire et des lagunes laissant supposer une bonne connexion entre les eaux souterraines et superficielles. Les analyses ont aussi mis en évidence de fortes teneurs en matière organique et en fer et la vulnérabilité des milieux avec un cas de contamination par des nitrates et des pesticides dans un environnement agricole. Le niveau piézométrique le plus profond a quant à lui été mesuré à 55 cm de profondeur en août 2014 confortant ainsi l'hypothèse d'une participation très probable de la nappe superficielle à l'alimentation des lagunes en période de plus hautes eaux.

En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de proposer un schéma conceptuel de fonctionnement pour l'ensemble des lagunes landaises. La **mise en place de 5 piézomètres** nivelés au droit de la lagune de Paulin à Cere, leur suivi régulier sur au moins 2 cycles hydrologiques avec l'installation d'un capteur de suivi des niveaux en continu ainsi que la prise en compte des données météorologiques devrait néanmoins permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de cette lagune pilote à court terme. Des pompages d'essai destinés à déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe pourraient même être envisagés au droit de ce site afin de déterminer avec plus de précision la zone d'influence de la lagune.

Si les pratiques culturelles et le drainage intensif menés dans les années 80-90 sont identifiés comme une des **causes les plus probables de la disparition** des lagunes observée entre 1983 et 1994 (- 53 %), les facteurs potentiellement responsables de la disparition des lagunes observée entre 1994 et la période 2005-2008 (- 28 %) devaient être étudiés.

Parmi tous les facteurs étudiés dans le cadre de cette étude (climatologiques, morphologiques, géologiques, anthropiques), il est apparu que les **facteurs climatiques et anthropiques** constituaient les 2 pistes les plus probables.

L'évolution défavorable des **températures** (+1°C lors des 25 dernières années) et des **précipitations** (- 17 % de pluie sur la période 2000-2012 par rapport à la période 1990-2000) au droit du département des Landes, mise en évidence par l'analyse des données relatives à la station de Mont-de-Marsan, peut en effet avoir eu un impact négatif sur le maintien des lagunes avec une augmentation de l'évaporation et une diminution de l'alimentation directe. Il semble en tout cas que cette évolution ait eu un impact négatif sur la nappe superficielle (baisse de quelques cm observée au droit de quelques piézomètres de référence sur les 25 dernières années).

Si ce facteur n'est probablement pas le seul à l'origine de la disparition des lagunes, il constitue une **hypothèse** à ne pas écarter, en particulier pour les milieux les plus vulnérables (lagunes de faible profondeur ou non connectées à la nappe en particulier).

Il convient en tout cas de retenir que les inventaires de lagunes ont été réalisés dans des **contextes climatiques très différents** (humide au début des années 1990 et sec à partir de 2001) et que l'impact des conditions climatiques sur le fonctionnement des lagunes est évident. Récemment (suite aux fortes précipitations de 2013), on a effectivement noté la réapparition de zones humides au droit de lagunes considérées comme asséchées (ex : Cere).

Les **travaux d'aménagement et de drainage** (au sens large) ainsi que les opérations nécessaires à la **gestion forestière du massif de pins maritimes** constituent une autre **hypothèse** pour expliquer la disparition de certaines lagunes même si ces opérations ont été réalisées dans le respect de l'environnement et des bonnes pratiques.

A ce titre, il pourrait être intéressant de **retracer l'évolution** d'une dizaine de lagunes considérées comme disparues. Les investigations pourraient consister en la mise en œuvre de techniques novatrices (télédétection, drone, ULM, lever LIDAR...) pour mieux appréhender la géométrie des systèmes lagunes/fossés et se poursuivre par une enquête auprès des propriétaires pour identifier les actions mises en œuvre lors des 20 à 30 dernières années. Cela permettrait en particulier d'apprécier plus finement la part de responsabilité de chaque facteur (météorologique ou anthropique) dans le phénomène de disparition des lagunes.

12. Bibliographie

BERTRAN P. et BATEMAN M. D. (2011) - Inland aeolian deposits of south-west France: facies, stratigraphy and chronology. *JQS*.

BERTRAN P., ANDRIEUX E. et ANTOINE P. (2013) - Distribution and chronology of Pleistocene permafrost features in France: Data base and first results. *BOREAS*.

CORBIER P., KARNAY G. avec la collaboration de BOURGINE B. et SALTEL M. (2010) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 7 - Année 1 - BRGM/RP-57813-FR, 187 pages, 36 figures, 6 ann.

CORBIER P., SALTEL M. et DAVID A. avec la collaboration de BOURDONNE R. et LABARTHÉ B. (2011) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 2 - BRGM/RP-60259-FR, 63 pages, 26 figures, 10 ann.

CORBIER P. avec la collaboration de BOURDONNE R. et JONCHERAY Y. (2012) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 3 - BRGM/RP-61303-FR, 112 pages, 59 figures, 5 ann.

CORBIER P. et CABARET O. (2014) - Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 6 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-63168-FR, 113 p., 81 ill., 3 ann.

Direction de la climatologie. (2008) - Séries homogénéisées. Météo France.

FAURE E. et GALOP D. (2011) - La fin du paradigme du désert landais : histoire de la végétation et de l'anthropisation à partir de l'étude palynologique de quelques lagunes de la Grande-Lande. De la lagune à l'airial.

GEREA (1994) - Lagunes de Haute Lande.

JUN R. et DEBORDE S. (2013) - Etude des continuités écologiques du département des Landes. Département des Landes et SIRS.

KARNAY G. et CORBIER P. (2008) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 7 - Année 1. BRGM/RP-56475-FR, 73 p., 25 fig., 6 tabl.

KUNDZEWICZ (2000) - Organisation Météorologique Mondiale.

L'écho des Faluns (2014) - Saucats, n°35-36, 2014, p.11

LENOBLE A., BERTRAN P., MERCIER N. et SITZA L.. Le site du Lac Bleu et la question de l'extension du pergélisol en France au Pléistocène supérieur. Quaternaire continental d'Aquitaine, excursion AFEQ-ASF, 2012.

LE TREUT H. (2013) - Prévoir pour agir.

Office National des Forêts (2008) - Notice technique sur les techniques de gestion des réseaux de drainage.

Office National des Forêts (2013) - Itinéraires Techniques de Travaux Sylvicoles. (révision post-Klaus 2013) - Plateau landais : pins maritimes des Landes.

SALMI T. et MAATTA A. (2002) - Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates -The excel template application makesens. Helsinki.

SALTEL M. (2008) - Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds. Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Boadeaux. Thèse de Doctorat, Bordeaux III, 268 p..

SINCLAIR W. et STEWART J. (1985) - Sinkhole type, developement and distribution in Florida. Florida: U.S. Geological Survey.

SITZIA L. (2014) - Chronostratigraphie et distribution spatiale des dépôts éoliens quaternaires du Bassin aquitain. Bordeaux.

TEXIER J.P. (2011). Génèse des lagunes landaises : un point sur la question. De la lagune à l'airial. Le peuplement de la Grande Lande. Aquitania, Supplément 24. Travaux et colloques scientifiques du PNRLG 6, APOL, Hors série 5, Bordeaux.

VERNOUX JF. et SEGUIN JJ. (2011) - Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Année 1. BRGM/RP-59286-FR, 131 pages, 69 figures, 27 tabl. et 4 ann.

VERNOUX JF. et SEGUIN JJ. (2012) - Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Année 2. BRGM/RP-61020-FR, 143 pages, 40 ill., 11 tabl. et 4 ann.

VERNOUX JF. et SEGUIN JJ. (2013) - Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Année 3. BRGM/RP-61807-FR, 110 pages, 66 ill. et 4 ann.

Annexe 1

Détail des méthodes statistiques utilisées



Recherche d'une non stationnarité dans les séries piézométriques

TESTS STATISTIQUES

1.1.1. Tests retenus et variables traitées

Une série chronologique (de pluies, de débits, de niveaux piézométriques, ...) est considérée comme non stationnaire si certaines de ses caractéristiques ont varié au cours du temps. Il peut y avoir :

- soit une modification graduelle au cours du temps, qui se manifeste par une tendance à la baisse (ou à la hausse) des valeurs de la série,
- soit une rupture (ou plus) survenant à une certaine date, les caractéristiques de la série n'étant plus les mêmes à partir de la date de rupture,
- soit un changement dans la distribution de probabilité d'une variable caractérisant la série à partir d'une date donnée.

Pour détecter ces changements et surtout leur significativité (au sens statistique), de nombreuses méthodes ont été mises au point depuis longtemps puis régulièrement affinées en hydro-climatologie, en particulier dans le cadre des études portant sur le "changement climatique".

On trouvera une liste de ces méthodes et de nombreuses références dans la thèse de B. Renard (2006) et dans un document de l'Organisation Météorologique Mondiale (Kundzewicz, 2000).

Dans le cadre de l'étude des séries piézométriques, Vernoux et Seguin (2011) proposent d'utiliser les méthodes et tests statistiques suivants :

- pour la détection d'une tendance (cf. § 5.1.2.) :

- la régression linéaire et le test de significativité du coefficient de régression,
- la régression linéaire "modifiée" dans le cas d'une autocorrélation présente dans la série étudiée,
- la méthode et le test de Mann Kendall,
- le test de Mann-Kendall modifié dans le cas d'une autocorrélation ;

- pour la détection d'une rupture (cf. § 5.1.2.) :

- le test de Pettitt.

1.1.2. Caractéristiques de tests de "tendance/rupture"

Les tests de Mann-Kendall et de Pettitt appartiennent à la catégorie des tests dits "non paramétriques".

Les tests "non paramétriques" ne nécessitent pas d'hypothèse sur la loi de distribution de la variable étudiée. Ils peuvent en particulier s'appliquer aux petits échantillons où la condition de Normalité est difficile à vérifier. Ils reposent pour la plupart sur un principe simple utilisant le classement des observations. Ils sont peu sensibles aux valeurs extrêmes.

Les tests "paramétriques" ne peuvent être utilisés que sous certaines conditions ; en particulier ils requièrent que les données soient distribuées suivant une certaine loi de probabilité, en général une Loi Normale (une transformation appropriée peut parfois être appliquée aux données pour rendre la distribution "Normale" si elle ne l'est pas).

1.1.3. Rappel sur les tests d'hypothèses

Les tests d'hypothèses ont pour but de vérifier la validité d'une hypothèse faite sur un échantillon de données. L'hypothèse à tester est classiquement appelée "*hypothèse nulle*" et désignée par H_0 . Si l'on décide de rejeter cette hypothèse, c'est pour admettre implicitement la validité d'une autre hypothèse H_a , appelée "*hypothèse alternative*".

La mise en œuvre du test nécessite la construction d'une *statistique de test*, c'est-à-dire d'une variable aléatoire dont on connaît la distribution de probabilité. La valeur calculée pour cette variable à partir de l'échantillon de données est ensuite comparée à la valeur théorique issue de la loi de probabilité pour un *niveau de confiance* (ou *seuil de risque*) que l'on se donne, désigné par α ; en général α est pris égal à 1%, 5% ou 10%.

Pour décider, la comparaison peut aussi être faite entre le seuil de risque que l'on se donne et la probabilité correspondant à la valeur calculée de la *statistique de test*, appelée "*p-value*".

La *p-value* est le niveau de confiance extrême du test qui permet de rejeter l'hypothèse nulle (H_0 sera rejetée au seuil de risque α si la *p-value* est inférieure à α). Plus la *p-value* sera faible, moins l'hypothèse nulle sera crédible et donc plus grande sera la confiance que l'on pourra accorder à l'hypothèse alternative.

Si l'hypothèse H_0 est rejetée au seuil α alors qu'elle est vraie, on commet une erreur appelée *erreur de première espèce*, dont la probabilité est α .

1.1.4. Problème de l'autocorrélation

Toute démarche probabiliste repose sur la notion d'indépendance des observations traitées. Il faut donc s'assurer que les valeurs successives de la série constituée sont bien indépendantes les unes des autres. C'est généralement le cas en hydrologie pour des valeurs mensuelles : dans une série pluriannuelle de débits moyens mensuels, le débit d'un mois donné est en général indépendant de celui du mois précédent (sans soutien d'une nappe). C'est encore plus vrai pour des valeurs moyennes annuelles.

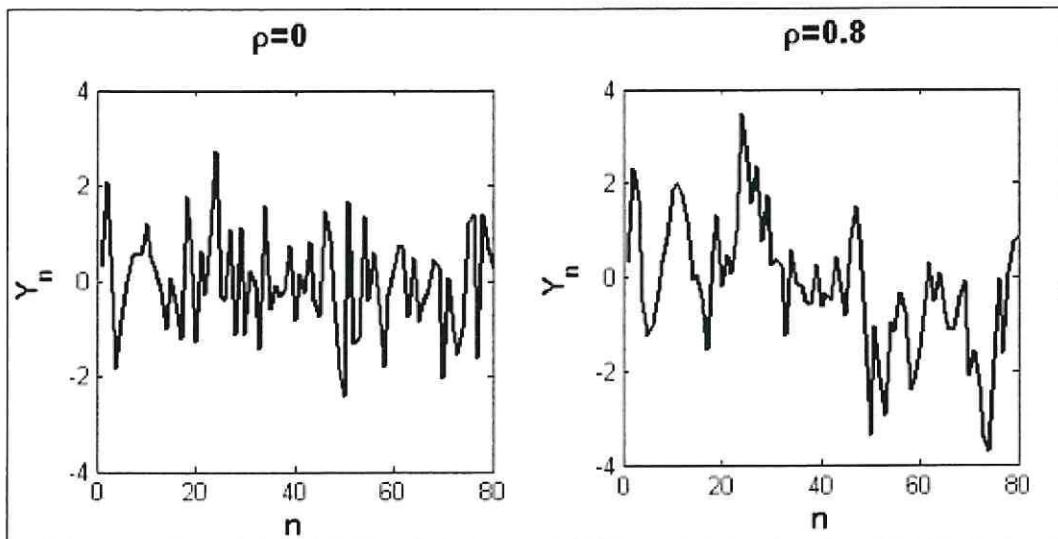
Par contre, pour des nappes, le niveau d'un mois donné dépend en général du niveau des mois précédents, la "portée temporelle" de cette dépendance étant d'autant plus grande que "l'inertie" de la nappe est importante (par exemple la nappe des Calcaires de Beauce où les temps de régulation sont très longs, de plusieurs années). Il y a autocorrélation (corrélation entre elles des valeurs successives de la série).

Lorsque dans une série pluriannuelle de niveaux moyens mensuels on extrait les valeurs d'un mois donné pour constituer une série "dérivée", cette autocorrélation peut s'atténuer, voire disparaître. Dans le cas des grandes nappes, une autocorrélation significative peut néanmoins persister. C'est la raison pour laquelle il faut vérifier que la série dérivée vérifie bien la notion d'indépendance. Cette vérification peut se faire par l'intermédiaire d'un corrélogramme.

Le corrélogramme permet de mettre en évidence dans une série de données temporelles le degré de corrélation existant entre valeurs successives de la série pour des intervalles de temps croissants. Le corrélogramme représente graphiquement la corrélation qui existe entre les valeurs de la série lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3,

L'existence d'autocorrélation dans les séries crée des tendances apparentes qui peuvent conclure à un taux de rejet important de l'hypothèse H_0 , donc indiquer une tendance alors même qu'elle n'est que la manifestation d'une certaine autocorrélation.

La figure ci-dessous, empruntée à la thèse de B. Renard, illustre ce phénomène.



Tendance apparente induite par une autocorrélation des données

Source : Thèse B. Renard, 2006

Pour s'affranchir de ce problème, plusieurs méthodes ont été proposées (cf. suite).

1.1.5. Recherche d'une tendance par régression linéaire

1.1.5.1. Les valeurs de la série ne sont pas corrélées entre elles

- *Conditions d'application du test de détection*

Le modèle de régression linéaire est le suivant :

$$Y = a.t + b + E$$

- Y est la variable aléatoire associée aux valeurs mesurées $y(t)$,
- t est le temps,
- a est le coefficient de la régression (la pente de la droite),
- E est une variable aléatoire représentant les écarts par rapport à la droite de régression $a.t + b$

On souhaite savoir si le coefficient a est significativement différent de 0. L'hypothèse nulle à tester est donc " $H_0: a=0$ "

Outre le fait que les valeurs de la série étudiée ne doivent pas être corrélées entre elles (hypothèse d'indépendance à la base de toute étude probabiliste) l'application du test suppose que les valeurs e_i de la variable E (les "erreurs") soient :

- distribuées suivant une loi normale (les valeurs de la série devant suivre aussi une loi normale),
- de moyenne nulle,
- non corrélées entre elles.

La vérification du calcul des résidus peut se faire au travers des tests suivants :

- test de Shapiro-Wilk pour vérifier la "normalité" de la distribution,
- test de Durbin-Watson pour vérifier l'absence d'autocorrélation.

1.1.5.2. Les valeurs de la série sont corrélées entre elles.

Comme mentionné ci-dessus, la présence d'autocorrélation dans une série de données biaise les tests statistiques qui reposent sur l'hypothèse d'indépendance des valeurs de la série (réalisations d'une variable aléatoire).

Pour pouvoir utiliser le test de régression linéaire, une solution, proposée par Bayley et Hammersley (1946) consiste à remplacer le nombre de valeurs n par un nombre n^* ("effective number of independant observations"), ce nombre n^* renvoyant à une série dont les n^* valeurs correspondraient à des observations indépendantes (condition d'application du test de régression). Ce nombre n^* est calculé par la relation :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{k=1}^{n-1} (n - k) \rho_k$$

ρ_k est le coefficient d'autocorrélation d'ordre k de la série étudiée.

1.1.6. Recherche d'une tendance par le test de Mann-Kendall

1.1.6.1. Les valeurs de la série ne sont pas corrélées entre elles

- Conditions d'application

S'applique à un échantillon de n valeurs indépendantes (non corrélées entre elles) pour détecter des tendances "monotones".

- Mise en œuvre du test

Le test repose sur le calcul de la somme suivante :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

où x_j et x_k sont deux valeurs successives de la série ($j > k$) et où :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

On dénombre donc pour tous les couples (x_j, x_k) le nombre de cas où la 2^{ième} valeur est supérieure à la 1^{ère} et le nombre de cas où c'est l'inverse et on fait la différence entre ces deux nombres. Si la série est stationnaire, S doit être proche de 0.

Le test ne nécessite pas d'hypothèse sur la distribution des valeurs (test non paramétrique). Si la série est stationnaire (hypothèse H_0), alors :

- la moyenne de S est : $E(S) = 0$
- et sa variance est : $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance $\text{Var}(S)$ doit être calculée comme suit :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p (E_p - 1)(2E_p + 5) \right]$$

où E_p désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant p valeurs.

Si le nombre n de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait intervenir la variable aléatoire Z définie par :

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0$$

$$Z = 0 \text{ si } S = 0$$

Une valeur positive de Z indique une tendance croissante.

Cette variable suit (approximativement) une loi normale centrée réduite. La probabilité d'observer une tendance pour laquelle la valeur de Z est au moins égale en valeur absolue à z_{obs} est alors :

$$P(|Z| \geq |z_{\text{obs}}|) = 2(1 - \Phi(|z_{\text{obs}}|))$$

où Φ est la fonction de répartition de la loi normale.

L'hypothèse de stationnarité sera rejetée au niveau de signification α si cette probabilité calculée (p-value) est inférieure à α (elle est peu probable).

Le résultat du test, au niveau de signification α , s'obtient aussi en comparant la valeur z_{obs} obtenue pour Z à la valeur théorique z_{th} de la distribution cumulée de la loi normale centrée réduite (fonction de répartition). Pour un test bilatéral (*two-tailed test*) visant la détection d'une tendance à un niveau de confiance α , H_0 est rejetée si la valeur absolue de Z est supérieure à $Z_{1-\alpha/2}$.

si $|z_{\text{obs}}| > z_{\text{th}(1-\alpha/2)}$, rejet de H_0 au seuil de confiance α

1.1.6.2. Les valeurs de la série sont corrélées entre elles

Comme pour le cas de la régression linéaire, pour s'affranchir de l'autocorrélation, il est possible de calculer un nombre n^* d'observations supposées indépendantes, ce qui revient à substituer à la série initiale de n valeurs autocorrélées une série de n^* valeurs indépendantes, $n^* < n$ (nombre équivalent d'observations indépendantes).

Comme dans le cas de la régression linéaire, le nombre n^* peut être calculé en utilisant l'expression donnée par Bayley et Hammersley (1946) :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \rho_k \quad \rho_k \text{ étant le coefficient d'autocorrélation d'ordre } k$$

et :

$$\text{Var}(S) = \frac{n}{n^*} \text{Var}_{\rho=0}(S)$$

1.1.7. Recherche d'une rupture par le test de Pettitt

Ce test peut être utilisé pour savoir si la série étudiée présente une rupture significative. Il s'agit d'un test non paramétrique.

L'hypothèse nulle est H_0 = "absence de rupture" dans la série.

La mise en œuvre du test repose sur la variable aléatoire suivante :

$$U(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

Comme dans le cas du test de Mann-Kendall :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

La variable U s'apparente à la variable S du test de Mann-Kendall, mais dans ce cas les couples de valeur (x_j, x_i) sont formés par sélection d'une valeur de part et d'autre d'un point de rupture supposé de rang k dans la série. En faisant varier k de 1 à $n-1$, on obtient donc une variable U fonction de k .

La statistique de test est alors la variable :

$$Z = \max|U(k)|, k=1, \dots, n-1$$

La rupture possible se situerait alors au rang k_R correspondant au maximum de $U(k)$.

La probabilité de dépassement de la valeur z_{k_R} prise par la statistique Z du test sur la série observée est donnée par (Pettitt, 1979) :

$$\text{Prob}(Z > z_{k_R}) = 2 \exp\left(\frac{-6z_{k_R}^2}{n^3 + n^2}\right)$$

Pour un niveau de confiance α , l'hypothèse d'une rupture dans la série sera rejetée si cette valeur de probabilité est inférieure à α .

Annexe 2

Homogénéisation des données climatiques

Annexe

Séries homogénéisées

De la nécessité d'homogénéiser les longues séries

Analyser les évolutions climatiques à partir de mesures météorologiques exige de disposer de séries climatologiques suffisamment longues et dont les valeurs soient comparables dans le temps. Il est assez facile de constituer des séries cinquantenaires, voire centenaires, il est rare que ces dernières soient utilisables en l'état :

- la qualité des données originales n'est pas toujours irréprochable. Des erreurs de mesures ou de saisie peuvent avoir été introduites et les manques peuvent être fréquents.
- les événements susceptibles d'introduire dans les séries des ruptures d'homogénéité sont nombreux. Citons entre autres les déplacements des points de mesures ou la modification de leur environnement, les changements de capteurs ou d'observateurs, les changements de la définition de la journée climatologique ou changements d'heures d'observation, etc... Ces ruptures peuvent être du même ordre de grandeur que les changements que l'on cherche à mettre en évidence.

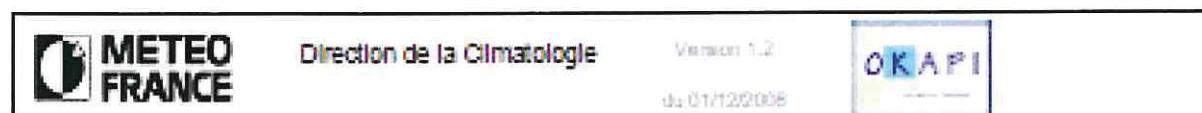
Il est donc indispensable avant toute analyse d'une série climatologique de s'assurer préalablement de la qualité des données, de rechercher les ruptures d'homogénéité dans la série et de les corriger, c'est à dire d'homogénéiser les séries. Il existe de nombreuses méthodes d'homogénéisation de longues séries. Une note de l'Organisation Mondiale de Météorologie (Aguilar et al.) insiste sur la nécessité d'homogénéiser les longues séries et présente le principe de l'homogénéisation des longues séries instrumentales.

La constitution d'un jeu de séries homogénéisées de température et de précipitations a permis à Météo-France de caractériser les changements climatiques en France métropolitaine au XX^e siècle (Moisselin et al., 2002).

Cette fiche produit présente la méthode d'homogénéisation développée et utilisée à Météo-France.

Principes de la méthodologie d'homogénéisation de Météo-France

La méthode d'homogénéisation est mise en œuvre sur un ensemble de plusieurs séries climatologiques appartenant à la même zone climatique. Les procédures de détection des ruptures et de correction exigent



que ces diverses séries soient relativement bien corrélées. Le traitement de séries nécessite donc de travailler à une échelle spatiale adaptée à la variabilité du paramètre étudié. Pour les précipitations, un domaine couvrant un ou deux départements est généralement bien adapté. Pour les températures, une étendue plus vaste de plusieurs départements ou une région peut-être envisagée.

La méthode d'homogénéisation comprend plusieurs étapes présentées ci-dessous :

1. Constitution des longues séries climatologiques

L'étape préliminaire est évidemment la constitution de longues séries. Cette opération est généralement réalisée par aboutement de divers postes sélectionnés en fonction de leur qualité. Les divers postes utilisés dans une série devant être bien corrélées, les postes sont donc choisis, dans la mesure du possible, proches et présentant des caractéristiques semblables.

Exemple de la longue série de précipitations mensuelles de Marnigane

Période de la série : 1895 à 2005

La série est constituée à partir des postes listés dans le tableau ci-dessous :

Liste des stations constituant la série :

Numéro de poste Météo-France	Nom du poste	Période
13042001	Berre l'Etang	1895-1949
13054001	Marnigane aéroport	1950-2005

2. Détection des ruptures

Les séries climatologiques sont le résultat de la superposition de deux signaux bien distincts : l'évolution climatique que l'on cherche à étudier et les changements dus à la modification des conditions de mesure.

Le principe de la détection de la méthode est basé sur la constatation suivante : entre deux ruptures, chaque série est homogène (par définition) et peut servir de référence. Si une série à tester est comparée individuellement à toutes les autres, certaines ruptures restent constantes dans le temps quelle que soit la série de comparaison et peuvent donc lui être attribuées.

La base théorique de cette méthode est présentée dans la thèse d'O. Mestre (2000) et dans l'article de Mestre (2004).

Les performances de la méthode sont directement liées à la qualité des séries et à la corrélation entre les séries comparées.



La méthode statistique estime l'ordre de grandeur de l'Amplitude Maximale des ruptures non Détectées dans les séries Instrumentales. Cette estimation est exprimée en pourcentage du cumul annuel pour les paramètres cumulatifs (précipitations, Insolation) et en valeur brute pour les paramètres additifs tels que la température. Cette amplitude est notée AMD. Elle peut varier sensiblement en fonction de la qualité de la série, de la variabilité spatiotemporelle du paramètre dans la zone étudiée et de la densité spatiale des postes.

Détermination des dates de ruptures

La méthode statistique propose des dates de ruptures, qui sont validées et affinées par l'expert climatologue en fonction de la connaissance des dates de modifications des conditions de mesures (métadonnées) archivées dans la Base de Données Climatologiques de Météo-France. La validation des ruptures est généralement une phase assez délicate et un travail d'expert. Si certaines ruptures apparaissent manifestes, il est parfois difficile de statuer d'entrée sur l'ensemble des ruptures à prendre en compte. En pratique, la validation des ruptures est réalisée en plusieurs cycles. Les ruptures délicates à valider ou non apparentes lors de la première détection sont susceptibles d'apparaître mieux marquées au cours de la suite de l'homogénéisation, voir exemple de Maignane chapitre 5.

3. Correction des séries

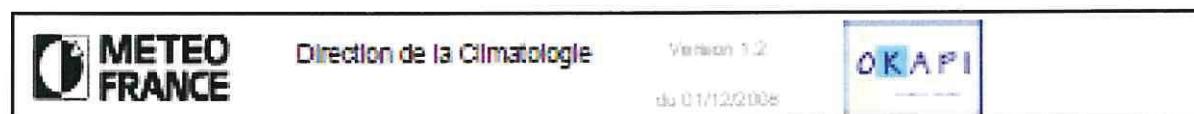
La connaissance des positions ou dates des ruptures permet ensuite de corriger les séries. La correction des séries est réalisée en utilisant un modèle statistique semblable à un modèle d'analyse de la variance à deux facteurs. On considère que les données observées pour un poste considéré résultent de l'addition d'un effet climatique et d'un effet de poste. Le facteur climatique varie chaque mois de la même manière pour l'ensemble des postes traités. Le facteur poste est quant à lui propre chaque série et fluctue lors des ruptures. Il reste cependant constant entre deux ruptures. Le modèle de correction initialisé à partir des ruptures détectées sur chaque série permet d'estimer le facteur climatique ainsi que les différents facteurs postes. Les coefficients correcteurs à apporter aux diverses périodes des diverses séries en sont déduits et appliqués aux séries originales pour élaborer les séries homogénéisées.

Pour les paramètres cumulatifs (précipitations, Insolation), un coefficient multiplicateur est appliqué à chaque période. Pour les paramètres additifs comme la température, une valeur fixe est ajoutée ou retranchée à chaque période.

Qualité des séries homogénéisées

La qualité des séries homogénéisées est variable. Elle dépend en premier de la qualité de la série d'origine, notamment du taux de données manquantes, en deuxième de l'amplitude des ruptures résiduelles et enfin du nombre de ruptures. La qualité de la série est fournie dans le fichier de données (moyenne, bonne).

Les séries homogénéisées ne comportent pas de données manquantes.



Exemple d'homogénéisation des séries de précipitations des Bouches du Rhône sur la période 1895-2005

On dispose de longues séries de précipitations mensuelles et annuelles dans les Bouches du Rhône et départements limitrophes sur une même période 1895-2005.

Les résultats des procédures de détection de ruptures sont visualisés sur des tableaux récapitulatifs qui présentent les ruptures détectées ainsi que l'estimation de l'Amplitude Maximale des ruptures résiduelles (AMD) pour chaque série de comparaison. La figure 1 présente un exemple de visualisation graphique des résultats issus des procédures de détection de ruptures.

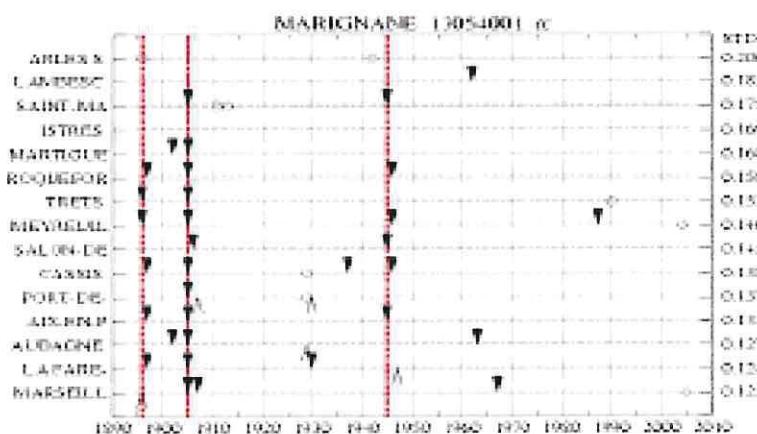


Figure 1 : détection des ruptures sur la série de précipitations de Marseillan avant homogénéisation

La série de précipitations de Marseillan est comparée à 15 autres séries dans cet exemple. Les ruptures détectées apparaissent sous forme de triangle noir et les points aberrants sous forme de A. Dans le cas présent, 3 ruptures nettes sont mises en évidence notamment en 1896, 1905 et 1945. Les trois traits rouges indiquent les 3 ruptures détectées au cours de la première détection et validées par l'expert climatologue. L'estimation de l'amplitude maximale des ruptures non détectées (AMD) est donnée dans la colonne de droite. Les séries sont classées par AMD croissant, de bas en haut. Ici, dans le meilleur des cas, l'AMD est de l'ordre de 12 % du cumul annuel, qui est une valeur d'AMD élevée, car il n'est pas rare d'avoir des AMD inférieures à 10 % au cours de l'homogénéisation des séries de précipitations.

La figure 2 ci-dessous représente les résultats de la détection initiale et de la détection dans les séries homogénéisées du dernier cycle détection-correction.



- 4^{ème} caractère : numéro de version de la série homogénéisée
- les huit derniers chiffres : numéro Météo-France du dernier poste de la série

Le nom de la série correspond au nom du dernier poste de la série

Exemple de la série des précipitations mensuelles à Marignane homogénéisée sur la période 1895-2005 :
Nom de série Marignane et numéro de série MFR113054001

Constitution de la série

La liste des postes qui constituent la série et les périodes correspondantes sont fournies dans un tableau.

Detection des ruptures

Le dernier tableau fournit la liste de dates de ruptures validées et l'Amplitude Maximale des ruptures résiduelles.

Avertissement sur l'utilisation des séries homogénéisées

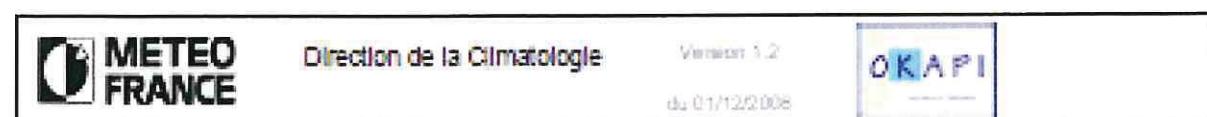
Le premier objectif de l'homogénéisation des séries est l'étude des évolutions climatiques. On doit cependant conserver à l'esprit que des ruptures peuvent subsister dans les séries homogénéisées, l'ordre de grandeur des ruptures résiduelles étant fourni par l'AMD. Il faut donc tenir compte de l'AMD au moins qualitativement lors de l'examen des incertitudes des résultats.

Les séries homogénéisées proposées dans ce produit sont des séries de paramètres mensuels ou annuels. Il est aussi à noter que les coefficients correcteurs calculés lors de la phase d'homogénéisation le sont à partir des données annuelles voire mensuelles. Il ne sont en aucun cas transposables aux données quotidiennes brutes. Les tests statistiques au pas de temps quotidien sont nettement plus complexes et dépendent de la situation météorologique.

Seul le numéro de série permet de distinguer les séries.

Des séries avec le même numéro Météo-France, correspondant au numéro de la dernière station de la série peuvent être constituées avec une liste de stations différentes et ont donc un numéro de série différent.

Météo-France peut proposer plusieurs séries homogénéisées pour un même poste et un même paramètre. L'enrichissement permanent de la Base de données Climatologiques de Météo-France peut amener l'expert climatologue à modifier la constitution d'une longue série et la correction des séries à l'occasion d'une réactualisation des séries homogénéisées. Dans ce cas, les valeurs des séries



homogénéisées disponibles pour le même nom de station et le même paramètre (mais avec un numéro de série différent) peuvent être légèrement différentes à la même date.

Metéo-France propose des séries homogénéisées pour les paramètres température, cumul de précipitations, durée d'insolation et pression atmosphérique.

Les contraintes de proximité des séries et la forte variabilité de la densité des longues séries de précipitations disponibles dans la Base de Données Climatologiques de Metéo-France rendent actuellement l'homogénéisation des longues séries de précipitations impossible dans de nombreux départements. Les séries homogénéisées ne sont pas disponibles dans tous les départements de France.

Références bibliographiques

- Agullar E., Auer I., Brunet., Peterson T.C., and Wieringa J., *Guidelines on climate data and homogenization*, WCDMP n°53, WMO -TD No. 1186.
- Mestre O., 2000, *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation des séries climatiques*, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Mestre O., 2004, *Detection and correction of artificial shifts*, *Appl. Statist.* (2004)53, Part 3, pp. 405–425.
- Molisselin J.-M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., 2002, *Les changements climatiques en France au XX^e siècle Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations*, *La Météorologie* n°38 août 2002, pp. 45-56.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Aquitaine
Parc technologique Europarc
24 Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70

