



SAGE Estuaire de la Gironde et Milieux Associés

SMIDDEST

– 12 rue Saint Simon – 33 390 BLAYE –
Tel : 05 57 42 28 76 - Fax : 05 57 42 75 10 -
smiddest@wanadoo.fr



EVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET PROSPECTIVE A MOYEN TERME

PHASE 1 : ANALYSE DES ENJEUX LIES A L'EAU

Avec la participation financière de :



Décembre 2008

67 allées Jean Jaurès
31000 Toulouse
Tél 05 61 62 50 68 –
Fax 05 61 62 65 58
E-mail eauce@eauce.fr

SOMMAIRE

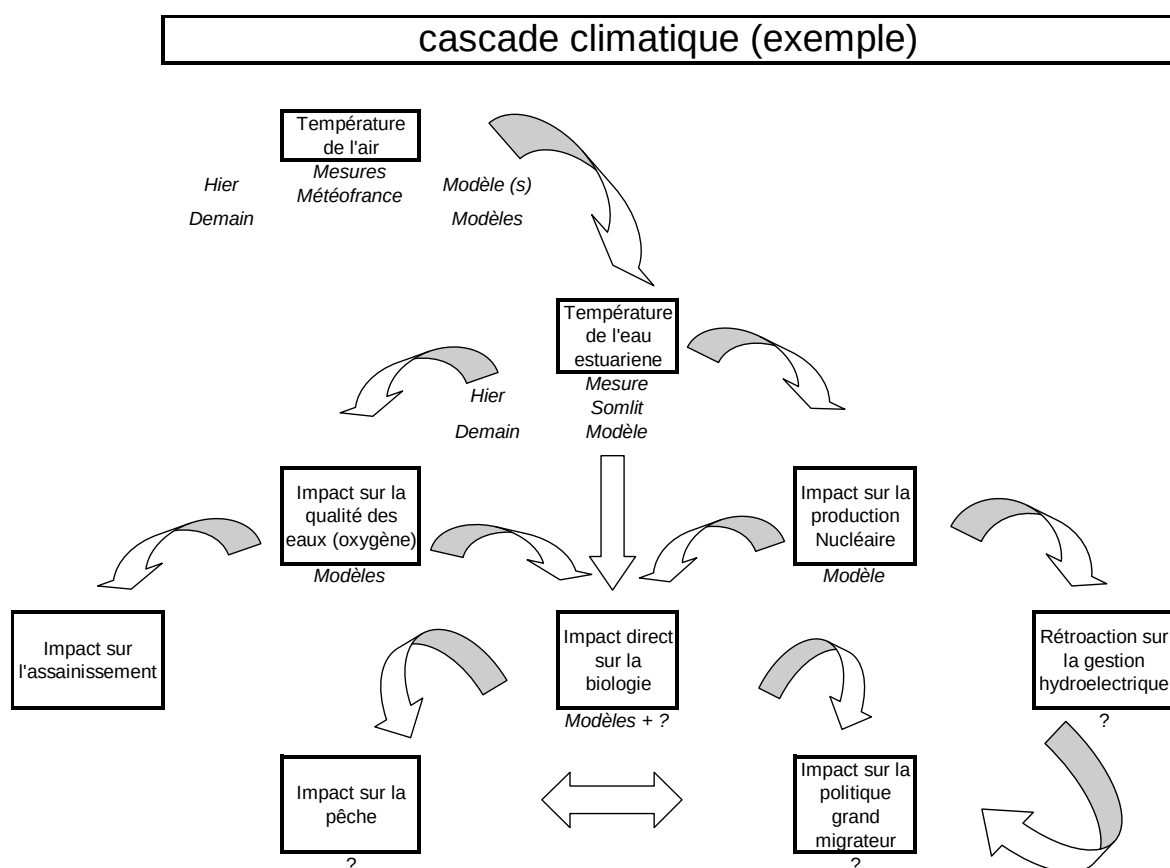
1 - Résumé.....	4
2 - Introduction	9
3 - Le périmètre du projet	11
3.1 - Géographie.....	11
3.2 - Histoire et prospective	12
4 - Les paramètres fondamentaux : niveau océanique, température, précipitation et vents	14
4.1 - Le niveau de l'océan	14
4.1.1 - Une histoire ancienne	14
4.1.2 - Observations marégraphiques	15
4.1.3 - Les limites géographiques de l'exercice	20
4.1.4 - Demain le niveau de la mer	20
4.1.5 - Conclusion provisoire sur le niveau marin	21
4.2 - Les données climatiques	21
4.2.1 - Données issues des mesures MétéoFrance	21
4.2.2 - Problèmes posés	23
4.2.3 - Données issues de scénarios climatiques applicables au territoire de l'estuaire.....	23
4.2.4 - Synthèse sur les informations climatiques mobilisées dans cette étude (mai 2008)	29
4.2.5 - Températures	29
4.2.6 - Evapotranspiration	35
4.2.7 - Précipitations moyennes annuelles et estivales	37
4.2.8 - Précipitations maximales journalières	40
4.2.9 - Les tempêtes	42
5 - Conséquences directes de l'évolution des paramètres fondamentaux sur les usages	44
5.1 - Les inondations marines et la gestion des marais	44
5.2 - Les productions végétales locales.....	47
5.2.1 - Les grandes cultures : le déficit hydrique	47
5.2.2 - Stratégie agricole envisageable	50
5.3 - La production forestière.....	50
5.3.1 - Situation actuelle	50
5.3.2 - Projection des conséquences climatiques	50
5.3.3 - Pratique forestière et spécificité du territoire.....	52
5.3.4 - Stratégies forestières face au risque climatique	52
5.4 - La vigne : modification du calendrier viticole	54
5.5 - Les canicules et le risque sanitaire.....	57
6 - Les futurs paramètres de l'hydrosystème	59
6.1 - L'hydrologie superficielle des grands cours d'eau	59
6.1.1 - Les données mesurées	59
6.1.2 - Une interaction forte avec l'aménagement du bassin versant	70
6.1.3 - Quels débits en 2030 ?	73
6.2 - Petits cours d'eau et zones humides	75
6.2.1 - Les petits cours d'eau	75
6.2.2 - Les Zones humides	78
6.3 - Les eaux souterraines	79

6.4 - La température des eaux estuariennes.....	80
6.4.1 - Constat.....	80
6.4.2 - Modélisation de la température.....	81
6.5 - La température des eaux douces	83
6.6 - La salinité estuarienne.....	84
6.7 - Les autres paramètres physico chimique	85
6.8 - Le bouchon vaseux	85
6.8.1 - Position.....	85
6.8.2 - Qualité des eaux.....	90
6.9 - Géographie et dynamique de l'envasement.....	93
6.9.1 - Evolution historique	93
6.9.2 - Les dragages d'entretien du PAB : un lien étroit avec l'hydrologie	93
6.9.3 - Effets hydrauliques.....	95
6.9.4 - Fluctuations des niveaux d'eau dans le domaine fluvial	95
7 - Conséquences directes des évolutions des paramètres de l'hydrosystème sur les usages.....	96
7.1 - Remise en perspective des stratégies de préservation des ressources en eau potable souterraine	96
7.2 - L'assainissement.....	97
7.3 - Aménagement rural et méconnaissance de l'évolution du risque de crue sur les petits bassins versants	98
7.4 - La production nucléaire	98
7.4.1 - Les enjeux.....	98
7.4.2 - Evaluation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de production électrique de la centrale du Blayais.	100
7.4.3 - Que représentent 100 000 MWh ?	103
7.5 - Disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation et restriction	103
7.6 - Conséquences sur la fréquence et la localisation des dragages d'entretien	104
8 - Les paramètres de l'écosystème	106
8.1 - La biodiversité estuarienne.....	106
8.2 - Faune aquatique.....	106
8.2.1 - Faune aviaire	109
9 - Les conséquences sur les usages en lien avec l'évolution de l'écosystème.....	112
9.1 - Sanitaire.....	112
9.2 - La pêche.....	112
9.3 - La chasse.....	113
10 - L'organisation des acteurs.....	114
10.1 - Les collectivités locales.....	114
10.2 - Organisation des acteurs à l'échelle du district : le SDAGE Adour Garonne	114
10.3 - Organisation des acteurs locaux : le Sage estuaire outil fédérateur	115
10.4 - Rôle et diffusion des travaux de prospective climatique	115
10.5 - Les structures de recherche sur les impacts des changements globaux.....	116
11 - Bibliographie sommaire	118

1 - RESUME

Il existe plusieurs manières d'aborder les enjeux liés à la mesure des évolutions climatiques et à la prise en compte des conséquences pour certaine déjà engagées. Dans ce rapport nous avons pris le parti de décrire la cascade des conséquences qui sont induites par les changements fondamentaux des paramètres du climat et du niveau de la mer. Il s'agit d'un premier panorama qui ouvre à chacune des thématiques évoquées, sur un champ de recherche fondamentale et appliquée extrêmement important. Ce projet a bénéficié du soutien du MEEDDAT et des premiers résultats de régionalisation des simulations climatiques produits par le Cerfacs.

Le vrai risque dans cet exercice de prospective est que le cumul des incertitudes à chaque saut de « la cascade » rend difficile la quantification des impacts. Nous avons pris le parti d'engager la réflexion dans le sens d'une identification des principales vulnérabilités potentielles de cet ensemble complexe, l'estuaire de la Gironde.



Le niveau océanique est le plus constant des paramètres en évolution avec des tendances à la hausse pluriséculaire. Un accroissement de 2 à 3 mm par an constitue une référence probablement réaliste du futur proche. **D'ici 2040 le niveau moyen serait donc augmenté d'environ 10 cm par rapport à aujourd'hui, mais il a aussi augmenté de 15 cm depuis les années 50.** Ce paramètre reste cependant difficile à approcher dans un environnement où les causes de fluctuation instantanées sont multiples et pour des ordres de grandeurs plusieurs dizaines ou centaines de fois supérieure (marée, tempêtes). Compte tenu du contexte estuarien, qui impose des spécificités qui ne se déduisent pas simplement de l'augmentation du niveau océanique, le réseau de marégraphes du PAB (notamment les marégraphes du

Verdon et de Pauillac) **constitue un outil irremplaçable pour le suivi et l'analyse des phénomènes en cours et suivi depuis 1914. Les travaux d'actualisation des analyses des chroniques sont à engager.**

Sur le plan des usages, la principale interrogation concerne les stratégies de défense et de gestion des zones de marais et de palus. Bien que d'une ampleur limitée, le phénomène d'augmentation du niveau océanique impose :

- De réexaminer la vulnérabilité de chaque marais sur le plan de la gestion des ouvrages de défense mais aussi sur la gestion des niveaux d'eau (porte à flot). Rappelons que le calage de ces ouvrages a été effectué avec des niveaux de référence plus faible que ceux d'aujourd'hui et encore plus de ceux de demain. Le Sage estuaire se préoccupe largement de cet enjeu. Il serait cependant utile de proposer des niveaux de référence « prospectif 2030 » aux différents pK de l'estuaire.
- D'expertiser l'évolution potentielle des phénomènes de sédimentation/érosion stratégique pour la gestion des estuaires et de la protection des berges et donc des ouvrages de défense. Rappelons que pour les estuaires, les chasses de désenvasement dépendent largement de la gestion des niveaux et donc du régime des débits d'eau douce entrant dans les marais.

Les températures ont augmenté et devraient continuer d'augmenter à un rythme d'environ 0,3°C par décennie. Les températures caniculaires seront plus fréquentes et les jours de gelée beaucoup plus rares. L'évolution est homogène sur le territoire et maintient les nuances du climat actuel (plus frais sur la côte). La pluviométrie montre peu de signaux tendanciels très clairs. Le volume de précipitation semble stable mais avec une décroissance modérée en été (juin, juillet, août). **C'est donc plus par l'augmentation de l'évapotranspiration que le bilan hydrique risque de s'aggraver.**

Les premières conséquences de l'évolution climatique seront :

- Un risque de déséquilibre du bilan hydrique des forêts mais aussi des cultures qui pourraient, sur des sols à faible réserve utile, nécessiter un recours accru à l'irrigation y compris pour la vigne ! Quoiqu'il en soit, dans les zones de sable les stratégies ancestrales de maîtrise de la nappe phréatique à des niveaux bas devrait être réexaminées avec l'ensemble des spéculations agro-forestières : culture, forêt, vigne.
- Une plus grande précocité du calendrier de gestion des vignobles. Au-delà des enjeux liés à la typicité des vins, deux conséquences potentielles concernent la gestion de l'eau : les rejets polluants en phase de vendange/vinification recouperont le cœur de l'étiage des cours d'eaux ; ils seront de moins en moins admissibles dans des cours d'eau par ailleurs moins abondants et plus chauds. Les stratégies de dépollution largement engagées sur le territoire sont à conforter.
- Un risque forestier accru sur le plan de la productivité (déficit hydrique contre balancé par l'augmentation du CO₂ atmosphérique) mais aussi sur le plan sanitaire et des incendies. La gestion de l'espace forestier et l'imbrication avec des parcelles cultivées (pare feu) et la maîtrise d'un urbanisme diffus sont les grands enjeux de demain. La diversification des essences forestières semble le meilleur rempart contre une évolution des risques difficiles à préciser à l'horizon 2060 ou plus.
- Un risque sanitaire lié aux canicules pour les populations avec des conséquences non évaluées sur le plan des usages liés à l'eau (fréquentation touristique sur le littoral, attractivité des milieux lacustre et des rivières, consommation d'eau domestique)

Les événements extrêmes pluie ou tempêtes sont les plus difficiles à analyser et encore plus à projeter car ils cumulent deux handicaps :

- ils sont rares et se prêtent difficilement à une analyse tendancielle sur des pas de temps de quelques dizaines d'années,
- ils sont très dépendants des échelles d'analyses, en particulier pour les pluies exceptionnelles.

Ces difficultés posent la question de la pertinence d'une révision des référentiels statistiques qui servent à l'analyse des risques. **Pour les tempêtes, la région sud ouest devrait être peu touchée par une évolution climatique.** Mais, la pluie décennale si importante pour les dimensionnements du pluvial en milieu urbain a-t-elle évolué ? Evoluera-t-elle à moyen terme ? Avec quelle intensité et dans quel sens ?

En deuxième niveau, les conséquences les plus lourdes vont se traduire sur le régime hydrologique des fleuves et rivières et sur le bilan des nappes. La part ruisselée ou drainée vers les nappes va se réduire. Les conséquences sur la ressource en eau douce sont alors préoccupante à plusieurs niveaux d'analyse :

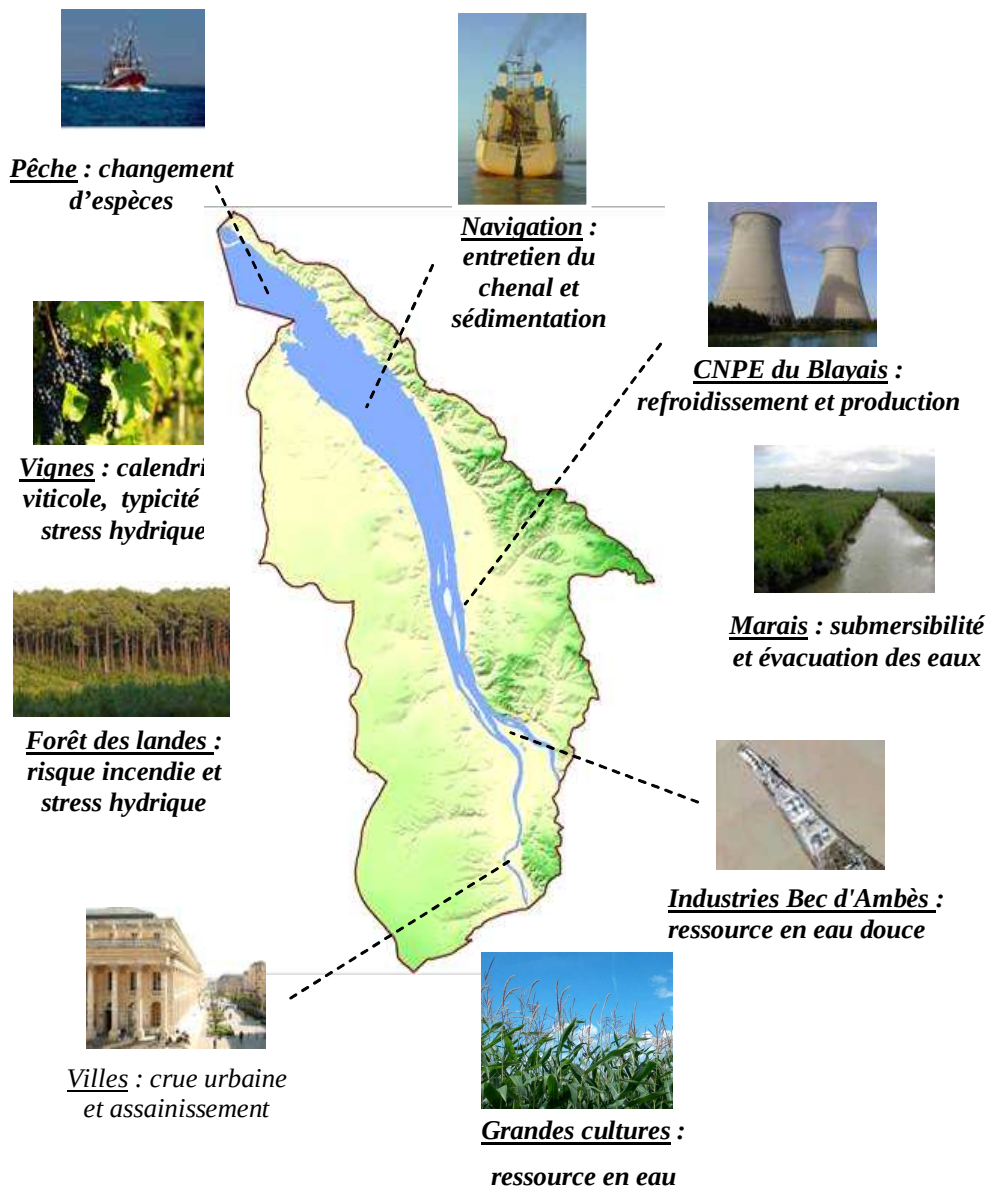
- Pour l'eau potable, le territoire est surtout appuyé sur des ressources souterraines dont l'inertie est importante. Cependant, cette ressource est déjà considérée en beaucoup d'endroits comme sur-sollicitée et le risque d'intrusion saline a motivé un lourd programme de rééquilibrage des prélèvements (Sage Nappes Profondes en Gironde). Les menaces d'une rupture à moyen terme de cet équilibre sont multiples : nouvel équilibre phréatique et biseau salé en lien avec l'augmentation du niveau de base d'une part mais aussi avec la tendance à l'augmentation de la salinité de l'estuaire; transfert d'usage des eaux superficielles vers les eaux souterraines en contradiction totale avec toutes les orientations du SAGE. Elles apparaissent cependant encore maîtrisables à moyen terme.
- Pour l'agriculture, les cultures irriguées verront leur demande unitaire augmenter tout comme les cultures pluviales ou la forêt. Le risque viendra plutôt d'une fragilisation de certaines ressources en eau en raison du déficit de ruissellement ou d'une vidange plus précoce des nappes. L'enjeu est d'anticiper les stratégies de gestion de ces ressources et du développement de stockage. Ce qui est vrai à l'échelle du territoire estuarien l'est aussi à l'échelle du grand bassin. Le risque touche lui les grands apports d'eau douce à l'estuaire que sont la Dordogne et surtout la Garonne. En addition du déficit « naturel » auquel on doit s'attendre (environ -25%), l'augmentation des prélèvements même à surface constante rendra beaucoup plus fréquent le risque de défaillance. Les stratégies d'accompagnement sont soit une réduction des usages soit un développement des opérations de soutien d'étiage, soit une réduction des débits objectifs. La définition de volume et débit prélevable, de débit et piézométrie d'objectif, de gestion des restrictions temporaires sont les grands chantiers de la gestion largement engagée et structurée par le réseau des SAGE et des PGE qui maillent aujourd'hui tout le bassin.
- Sur le plan de l'environnement cette baisse des débits aura elle-même des conséquences lourdes, avec pour tous les cours d'eau une exigence encore plus grande pour palier à la baisse des taux de dilution des rejets polluants

(agglomération, chais viticole). Pour l'estuaire, c'est surtout la carte de la salinité qui évoluera ainsi que le phénomène du bouchon vaseux. Pour ces deux raisons les usages qui s'appuient sur les eaux estuariennes comme ressource en eau (certains marais et palus, industrie du bec d'Ambès, projet d'alimentation en eau douce pour la CUB) verront les « fenêtres de tir » favorables à ces prélèvements se réduire.

- Toujours en raison de cette modification hydrologique, divers mécanismes de sédimentation pourraient évoluer avec comme conséquence la nécessité d'adapter la fréquence et la position des opérations d'entretien du chenal de navigation. Ce paramètre est d'ailleurs plus préoccupant pour la navigation que celui de l'évolution du niveau moyen océanique.
- L'estuaire plus salé sera aussi plus chaud et c'est sans doute le paramètre qui aura le plus de répercussion sur l'écosystème. Mais ce réchauffement aura aussi des répercussions sensibles sur la production nucléaire. Les contraintes imposées aux rejets thermiques se traduiront par des obligations de réduction de la puissance produite de plus en plus souvent. Compte tenu du poids considérable du CNPE du Blayais dans la production régionale et nationale, il est fort probable que des dérogations seront sollicitées. Une rétroaction avec la production hydroélectrique est aussi envisageable avec des conséquences potentiellement sensibles sur le régime estival de la Dordogne et de la Garonne.

Sur le plan des écosystèmes les inconnues sont très grandes. Les espèces en limite d'aire de répartition seront soit favorisées soit menacées de disparition de l'écosystème local. L'éperlan témoigne de la réalité de ces phénomènes. Dans cette phase de déséquilibre les espèces importées accidentellement ou volontairement occuperont de façon temporaire ou permanente des habitats avec des impacts sur les espèces autochtones. Le rythme de ces adaptations est encore mal évalué. Vis-à-vis des conséquences, il est aujourd'hui très difficile d'en préjuger sachant que la liste des services rendus par le fonctionnement de l'écosystème est encore délicate à évaluer. Les principales activités directement dépendantes de la faune et de la flore sauvage sont la pêche, la chasse et l'écotourisme. Ces activités vont subir l'évolution des abondances relatives des différentes espèces cibles. Leur responsabilité propre dans ces évolutions sera aussi objet de nombreuses négociations ce qui rend d'autant plus important la prospective sur la dynamique des populations. Le rôle d'observateur des milieux et d'acteur de la gestion restera donc central.

Les enjeux sur l'estuaire d'une évolution climatique



2 - INTRODUCTION

Les estuaires sont des milieux particulièrement complexes en raison de leur caractère de transition entre continent et océan. A la fois côtière et continentale, cette complexité se retrouve dans les dimensions hydrologiques (influence des marées et des eaux continentales), physicochimique (bouchon de turbidité et gradient de salinité), hydrogéologique (vulnérabilité des aquifères à la salinité), écologiques (frontière entre littoral et continent, zone de nourricerie ou de reproduction), et humaine (enjeu portuaire pour l'arrière pays).

L'administration de ces territoires est le reflet de cette complexité avec par exemple des contraintes spécifiques sur la gestion des rejets polluants dans un milieu oscillant, de la prévention des inondations avec l'implication de phénomènes de tempêtes.

L'évolution biquotidienne des paysages estuariens sous l'influence de la marée rappelle sans cesse que le mouvement et la gestion cyclique s'oppose à toute idée de stabilité des systèmes. Néanmoins, la stationnarité des phénomènes sur le long terme est implicitement admise par tous les acteurs de la gestion : les risques d'inondation en marais, les espèces pêchées, la fréquence et la saisonnalité des migrations de poissons ou d'oiseaux, le tirant d'eau d'un chenal, la permanence de la forêt Landaise et le cycle viticole sont des facteurs apparemment immuables qui déterminent un cadre pour l'action publique à moyen terme.

Les géographes et historiens connaissent l'illusion de cette stabilité mais ils ont pour eux leur propre échelle du temps. L'exposition de Cap Science posait bien cette dimension dynamique du territoire mais à des pas de temps hors de portée de la dimension sensible ou de temps de la gestion. Le changement climatique et la perception que tout un chacun en a nous menace d'une brutale accélération des choses.

Le cadre du Sage Estuaire, a permis de considérer la gestion de l'espace estuarien comme un tout, complexe certes mais ou quelques uns des mécanismes structurants et de leurs conséquences sur l'activité humaine peuvent être explicités ? Ce cadre est idéal pour réexaminer la vulnérabilité de nos activités à une modification de quelques paramètres qui pour les modélisateurs s'appellent variables de forçage. Le constat des modifications subies et observées dans le passé peut à terme se transformer en une capacité d'anticipation. Gérer c'est prévoir mais c'est aussi convaincre et surtout maîtriser les ordres de grandeurs des modifications qui s'engagent. Une des grandes difficultés méthodologiques rencontrées est de décrypter dans les observations la part subie des changements climatiques et la part de l'évolution concomitante de l'activité humaine. L'évolution de la pression d'irrigation sur les débits fluviaux est un exemple classique en Adour Garonne.

Le travail, s'est donc organisé en deux temps :

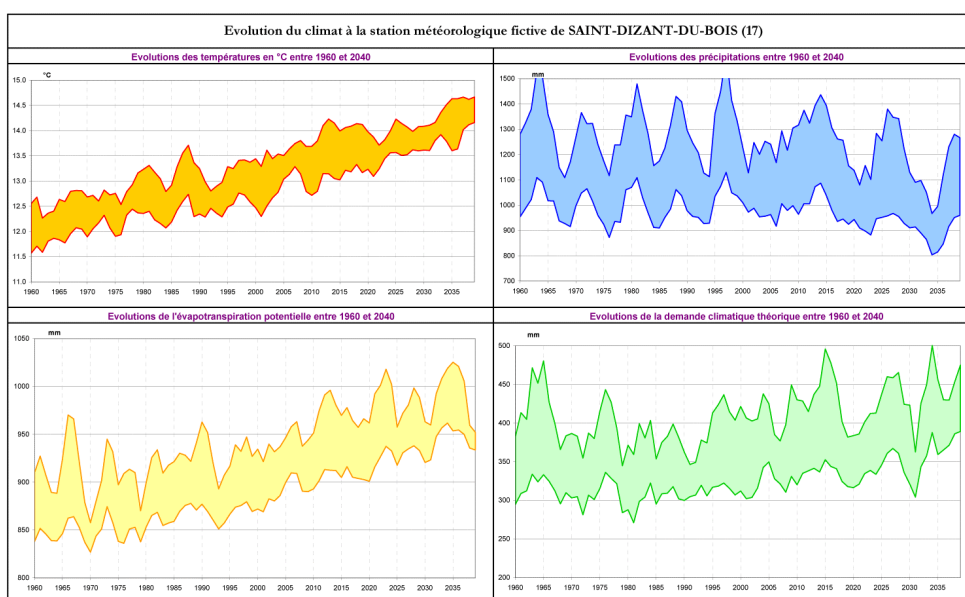
- Une consultation de plusieurs scientifiques (sédimentologues, hydrogéologues, écologues, spécialistes de la faune piscicole et aviaire, agronomes, forestiers, climatologues) et acteurs du territoire (port autonome et centrale nucléaire du Blayais) et une mise en perspective des principaux travaux du Sage estuaire. Ce temps a pour objet de hiérarchiser les principaux facteurs d'évolution tendanciel du périmètre d'étude en lien avec des variables climatiques et dans le domaine de l'eau. C'est aussi le temps de la mobilisation de données.
- Un deuxième temps permettra une confrontation des perspectives ainsi dégagées avec les acteurs de la gestion (administration et collectivité) et ceux de la connaissance (développement attendus).

Cette étude peut donc être considérée comme un essai de synthèse, premier pas vers une intégration des multiples pistes de réflexions qui sera relayée par l'ensemble des acteurs gestionnaires, et scientifiques et idéalement intégrés par le grand public.

Pour le premier point, le foisonnement des réflexions au niveau local et national, montre que la première difficulté à franchir sera celle d'une organisation rationnelle de l'effort de recherche notamment dans sa dimension opérationnelle.

Pour l'intégration par le grand public et l'administration, le Smiddest a souhaité créer un outil d'échange d'information sous la forme d'un site Internet qui sera développé au fur et à mesure de l'avancement des connaissances.

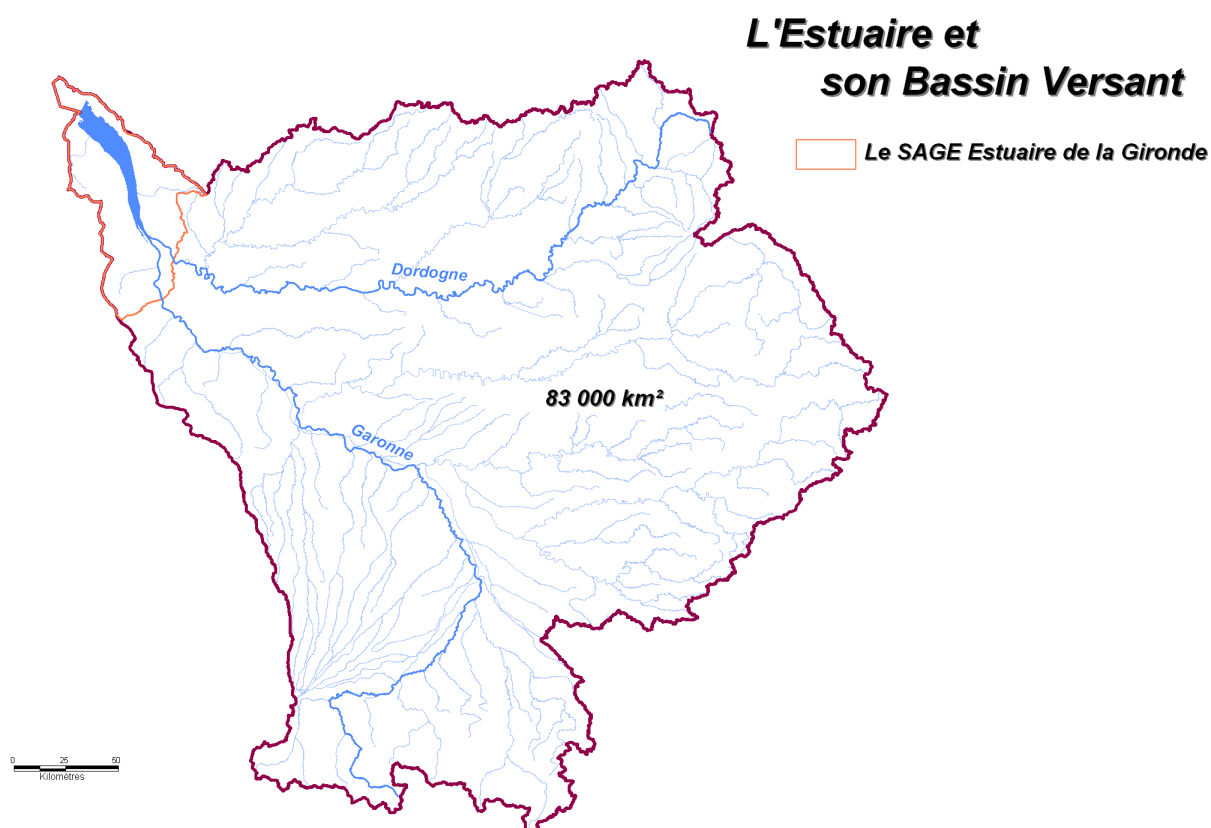
Un second rapport présente de façon distinct et plus concise la liste des indicateurs identifiés, les outils administratifs mobilisables dans une perspective d'adaptation et les principales orientations à prendre en compte.



3 - LE PERIMETRE DU PROJET

3.1 - Géographie

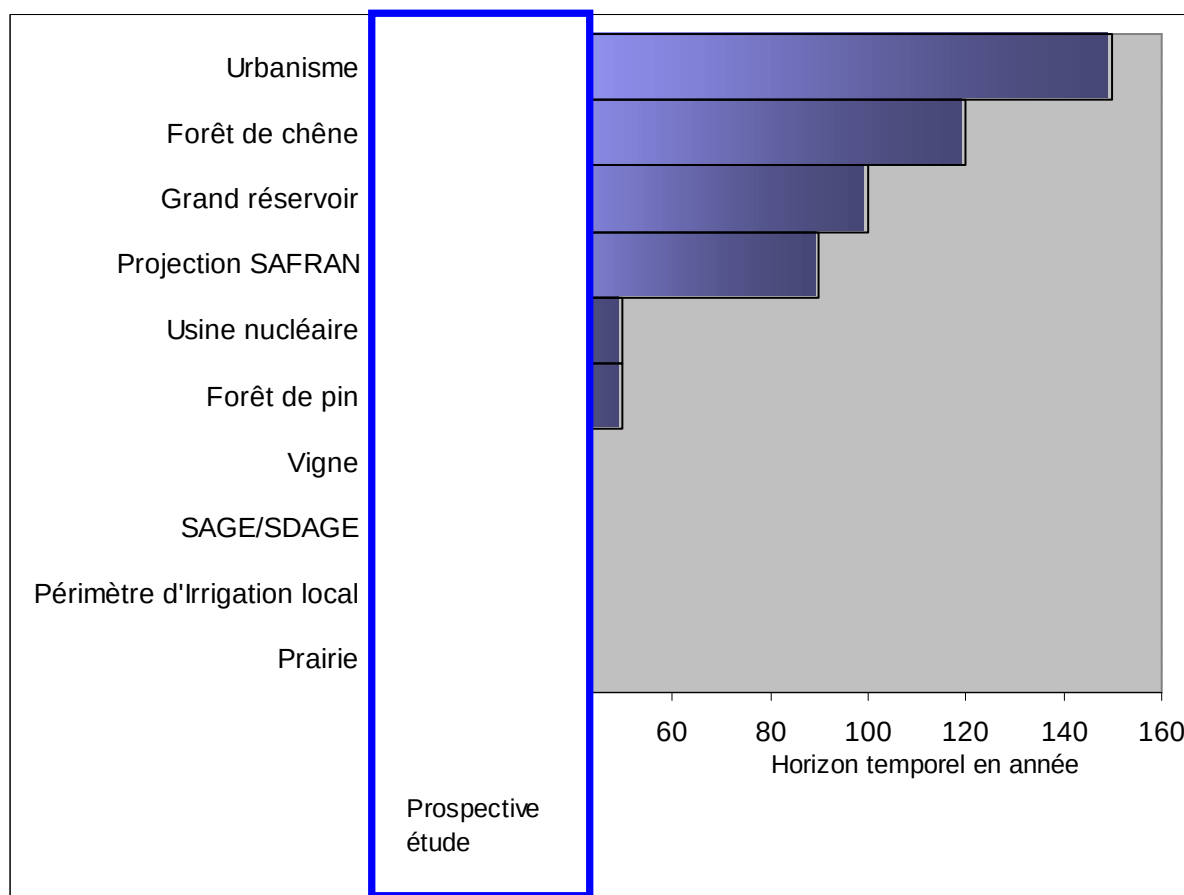
Le territoire de notre analyse correspond au périmètre du Sage « estuaire et milieux associés », à savoir les territoires riverains de l'estuaire et l'estuaire lui-même. Par essence, ce territoire impose une prise en compte de phénomènes hydrologiques du grand bassin versant (Dordogne et Garonne) et des évolutions maritimes (niveau océanique, physico chimie).



3.2 - Histoire et prospective

Du point de vue temporel, l'analyse historique n'a comme limite que la disponibilité de chroniques fiables, en général le début du XX^{ème} siècle ou les années 1950. Cette recherche systématique d'indicateurs historiques est le meilleur argument pour rendre sensible les phénomènes sur lesquels nous établirons des projections. Le 4^{ème} rapport du GIEC insiste d'ailleurs sur l'importance de l'analyse historique pour appuyer globalement la mise en perspective des risques futurs.

Pour l'analyse prospective, l'horizon de cette étude se limite volontairement au champ proche (2030/2040). Ce relatif court terme se situe donc dans le domaine des évolutions tendanciennes mais peut déjà bénéficier des résultats des simulations climatiques, notamment celles proposées par le CERFACS.



Ces simulations climatiques s'appuient sur des scénarios planétaires qui sont aujourd'hui largement codifiés par le GIEC.

Les scénarios d'émissions du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES)

A1. Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique : forte intensité de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B) ("équilibre" signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

A2. Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

B1. Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

B2. Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1.

Les scénarios SRES n'incluent pas d'initiatives climatiques supplémentaires, ce qui signifie que l'on n'inclut aucun scénario qui suppose expressément l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou des objectifs du Protocole de Kyoto pour les émissions.

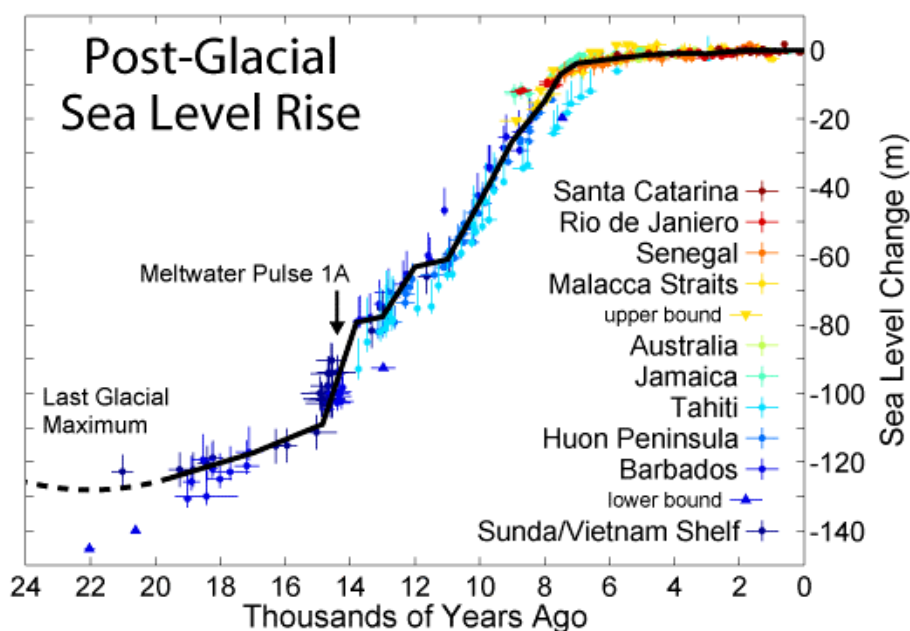
4 - LES PARAMETRES FONDAMENTAUX : NIVEAU OCEANIQUE, TEMPERATURE, PRECIPITATION ET VENTS

4.1 - Le niveau de l'océan

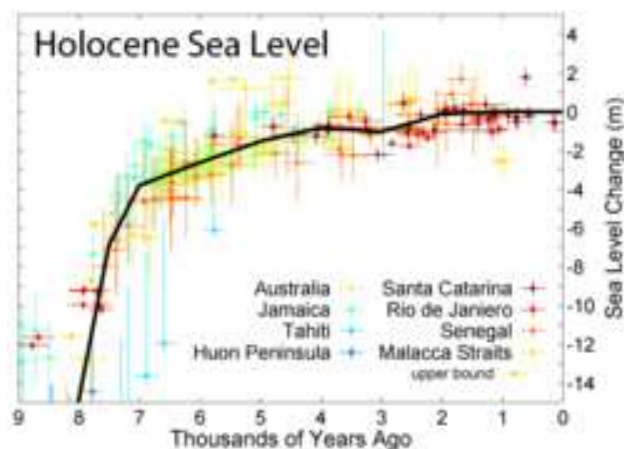
Sur le plan dynamique, le niveau des océans a toujours fluctué de façon relative par rapport au niveau continental. Dans certains secteurs d'Europe du Nord, les mouvements de rehaussement du plateau continental soulagés par la fonte des énormes glaciers de la dernière glaciation se traduisent même par une baisse apparente du niveau de la mer ! Dans la région de l'estuaire la stabilité géologique peut être considérée comme acquise aux échelles de temps qui nous préoccupent. Néanmoins ce phénomène de fluctuation du niveau de l'océan a connu de fortes variations avec des conséquences encore sensibles dans nos paysages (les zones de marais) et nos activités (risque de contamination des aquifères exploités pour l'eau potable ou l'agriculture par des nappes salées fossiles piégées lors de la dernière transgression).

4.1.1 - Une histoire ancienne

Les fluctuations du niveau marin en lien avec le climat ont laissé de nombreuses traces dans les sédiments ou plus près de nous dans le passé archéologique. La plus connue de ces variations est la très importante transgression qui a suivi la fin de l'époque glaciaire jusqu'au néolithique. Dans cette période de 6000 ans l'accroissement du niveau est estimé à plus de 100 mètres soit 1,7 cm par an en moyenne soit 100 fois plus rapidement qu'aujourd'hui.



La fin de cet épisode est plus complexe avec des fluctuations tantôt à la hausse (transgression) tantôt à la baisse (régression). La connaissance de ces fluctuations doit beaucoup aux travaux archéologiques.



Plus près de nous, sur les rives bordelaises de la Garonne, la mise au jour de trois plates-formes portuaires antiques et médiévales implantées sous le niveau des plus hautes mers de vives eaux (PHMVE) atteste pour certains scientifiques¹ d'une élévation de celui-ci de près de 1,10 m entre le XII^e et le XIV^e siècle qui se corrèle avec l'optimum climatique médiéval. Elle n'est pourtant pas reconnue au sein de la courbe d'élévation globale du niveau marin. Cette dernière tendrait donc à lisser des oscillations d'ordre séculaire et régional ... sauf si l'interprétation de phénomènes de sédimentation locaux est sans rapport avec le niveau océanique. Au-delà de cette controverse, l'interprétation des faits historiques illustre ce que l'approche pluridisciplinaire doit apporter au débat sur les phénomènes qui nous attendent.

4.1.2 - Observations marégraphiques

La notion de niveau moyen des océans apparaît spontanément évidente au grand public, habitué à considérer ce niveau comme une référence altimétrique. Les spécialistes savent cependant que ce niveau moyen pose de nombreuses questions puisqu'il faut par exemple intégrer les fluctuations permanentes dues aux forces de marée (plus de 5 mètres en Gironde). Par ailleurs, l'altitude du plan d'eau en un point donnée est très fortement impactée par des effets météorologiques.

Une dépression atmosphérique exerce une réduction de pression qui pour chaque baisse de 1 hectopascal (hPa) correspond à une montée du niveau moyen de 1 cm. La dépression de la tempête du 27 décembre 1999, c'est ainsi traduit par une surcote barométrique d'environ 25 cm.

C'est surtout le vent qui peut exercer une pression proportionnelle au carré de la vitesse ce qui dans l'estuaire - où les fonds sont faibles - est contrebalancé par une pente du plan d'eau. Un vent de 120 km/heure dans l'axe de l'estuaire se traduirait

¹ T. Gé et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

par des surcotes allant de 70 cm à l'embouchure et jusqu'à 150 cm au fond de l'estuaire. La houle induit aussi une montée des eaux côtières estimée dans le cas de la tempête à environ 35 cm. Enfin les vagues induisent des fluctuations qui en 1999 ont atteint les 5 mètres.

Il est donc important de se rappeler que si une valeur moyenne annuelle peut être calculée, ce niveau est soumis à de fortes fluctuations interannuelles.

Au niveau mondial, l'élévation du niveau de la mer est estimée à environ $1,8 \pm 0,5$ mm par an entre 1961 et 2003. Elle serait plus élevée dans la dernière décennie avec $+3,1$ mm/an entre 1993 et 2003. (Source 4^{ème} rapport du GIEC 2007).

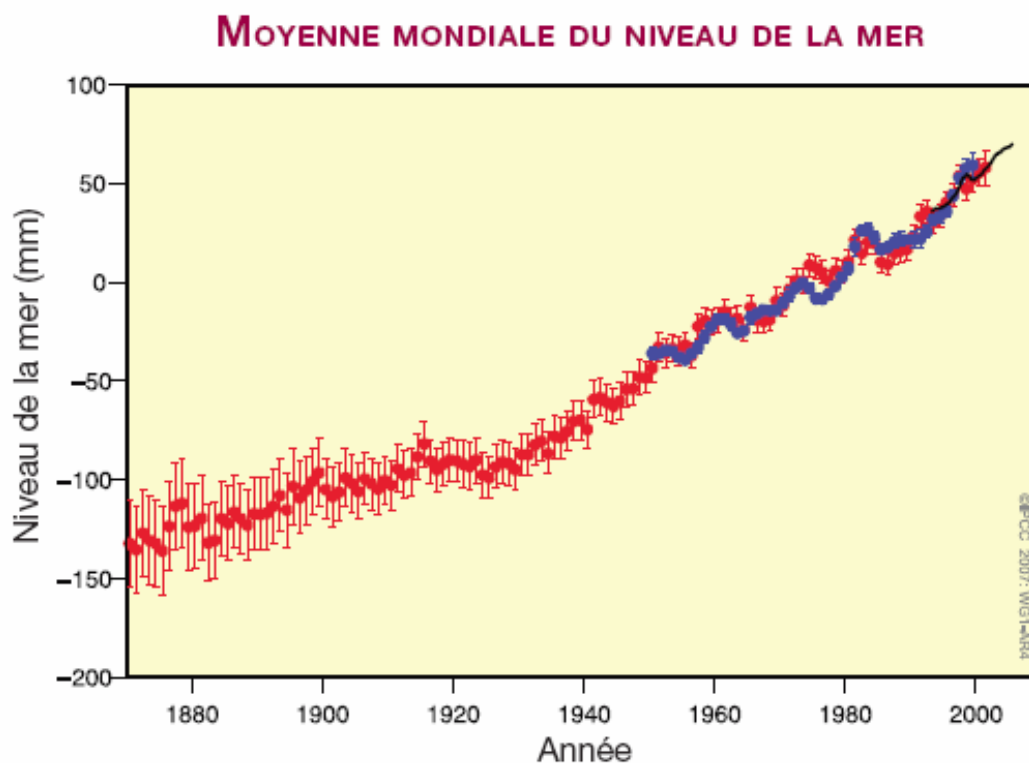
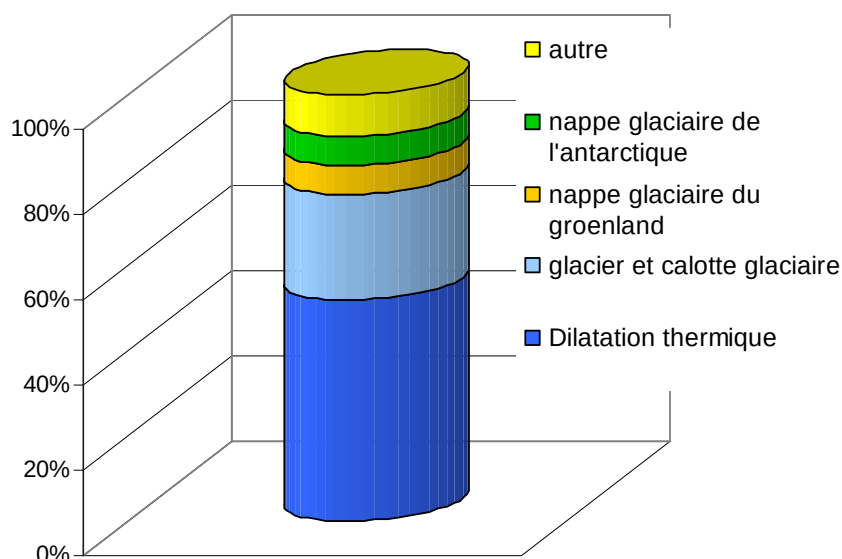


Figure RT.18. Moyennes annuelles du niveau moyen mondial de la mer sur la base de reconstructions de niveaux de zones de la mer (en rouge), mesures marégraphiques (en bleu), et altimétrie par satellite depuis 1992 (en noir). Les unités sont en millimètres par rapport à la moyenne de 1961 à 1990. Les barres d'erreur sont calibrées à 90% des intervalles de confiance. {Figure 5.13}

Les causes de cette augmentation sont globalement redistribuées entre plusieurs phénomènes :

Sources de l'élévation du niveau de la mer de 1993 à 2003



En France, seuls les sites de Brest et de Marseille possèdent les données requises pour détecter une tendance à long terme du niveau de la mer. En effet, les fluctuations des niveaux moyens annuels sont telles que la tendance ne peut être détectée que si la durée des observations est voisine du siècle.

Les niveaux atlantiques suivis à Brest depuis 1806 augmentent en moyenne approximativement de $1,13 \pm 0,05$ mm par an pour une variation interannuelle de l'ordre de 5 cm. L'élévation du niveau moyen à Brest était déjà sensible avant le début de l'ère industrielle et ne présente pas d'accélération perceptible, ce qui semble exclure l'influence de l'effet de serre. (Source « La marée » Bernard Simon Institut océanographique 2007).

Moyennes annuelles du niveau de la mer à Brest

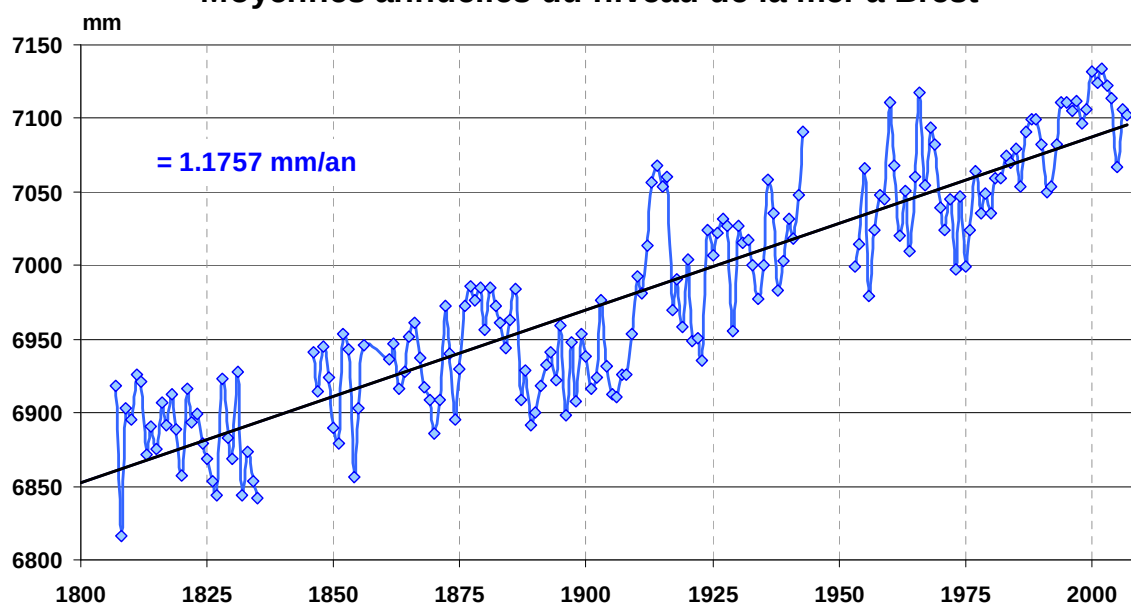
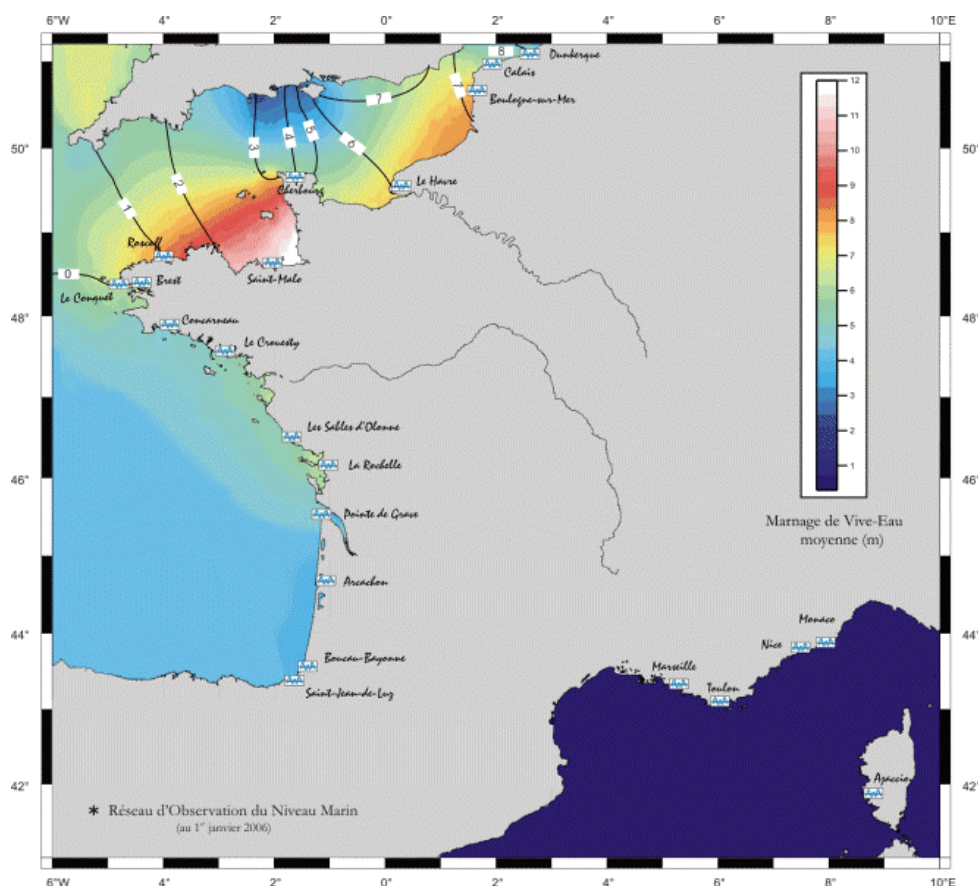


Figure 1 Graphe actualisé 2007 (Eaucéa)

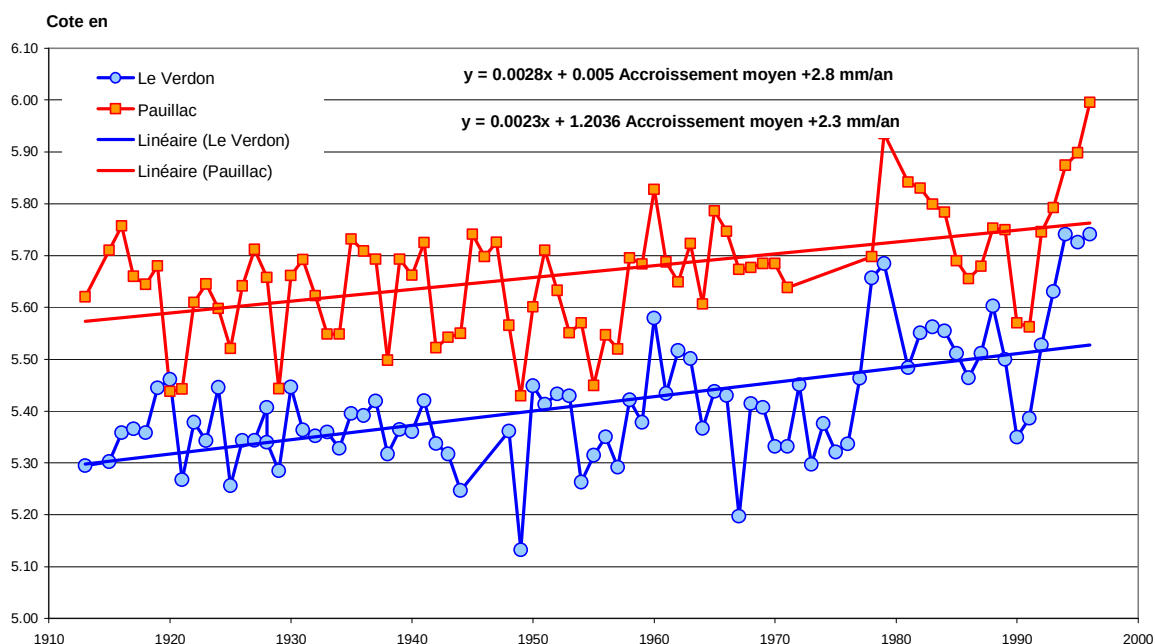
En France, le suivi actuel du niveau de la mer est pris en charge par le RONIM. Le réseau d'observatoires permanents du niveau de la mer qui doit couvrir les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer dont la pointe de Grave (Port Autonome de Bordeaux).



Sur l'estuaire de la Gironde, le phénomène de suivi de l'élévation est encore plus complexe en raison des effets hydrauliques qu'impose la géométrie de cet estuaire et de l'impact des débits fluviaux sur le cours amont de l'estuaire. Les enregistrements marégraphiques du Port Autonome de Bordeaux (PAB) montrent ainsi une déformation de l'onde de marée lorsque l'on remonte l'estuaire de l'océan vers les fleuves avec une durée de montée de plus en plus courte vers l'amont. Les marnages comme les surcôtes exceptionnelles sont aussi augmentés de l'aval vers l'amont.

Un premier travail de suivi sur le long terme des altitudes moyennes de hautes et basses mer des marées de vives eaux a été engagé par l'université de Bordeaux (professeur Castet) sur la période 1914/1996.

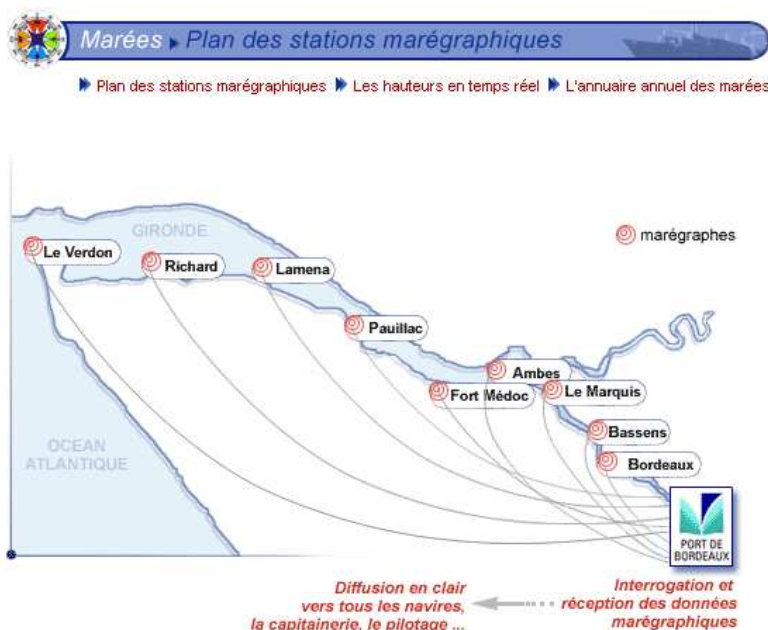
Elevation du niveau des eaux dans l'estuaire : moyenne annuelle des niveaux haut de marées de vives eaux



Ces travaux qui ont nécessité un très gros travail de dépouillement des archives marégraphiques, montrent que la Gironde suit sensiblement la même tendance que le marégraphe de Brest avec entre 2,8 et 2,2 mm par an. Dans les dix dernières années, les marégraphes ont bénéficié d'enregistrements automatiques informatisés ce qui devrait permettre une actualisation de cette chronique. Au vu du temps nécessaire pour le traitement de la donnée (environ 2 mois plein selon le PAB et l'Université), un stage a été envisagé avec la collaboration du PAB et de l'Université Bordeaux. Pour l'avenir, une réflexion sur l'entretien de l'indicateur doit être engagée.

Cette actualisation paraît d'autant plus intéressante que selon le GIEC « Le niveau moyen de la mer s'est élevé à un rythme de 1,8 (1,3 à 2,3) mm par an de 1961 à 2003. Cette vitesse a été plus rapide de 1993 à 2003, soit environ 3,1 (2,4 à 3,8) mm par an. Il reste à clarifier si cette plus grande vitesse pour 1993 à 2003 correspond à une variation décennale ou à un accroissement de la tendance à long terme ».

L'analyse de ce phénomène reste cependant complexe car l'on ne peut faire l'impasse sur un premier niveau d'interaction avec l'aménagement physique de l'estuaire dont les conséquences s'observent peut être dans la forme des marégrammes.



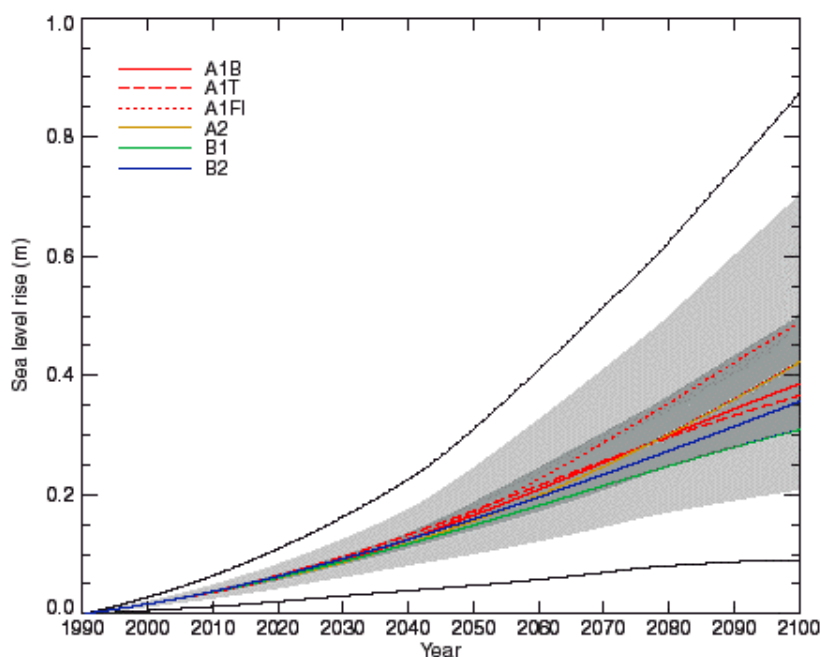
4.1.3 - Les limites géographiques de l'exercice

Le travail d'archive sur l'évolution hydro sédimentaire du système Garonne Dordogne au cours du dernier siècle de P.Castaing, H.Etcheber, A.Sottolichio, R.Cappe pour l'Agence de l'eau a mis en évidence la multiplicité des impacts sur ce qui détermine le niveau des eaux. En particulier, les **extractions de granulats** en Garonne ($> 30 \text{ hm}^3$) et Dordogne ont modifié la bathymétrie et le fonctionnement hydrologique du domaine fluvio-estuarien. **Le niveau y est en moyenne plus bas aujourd'hui que dans les années 1960.** Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'on s'éloigne de Bordeaux vers l'amont.

4.1.4 - Demain le niveau de la mer

Les projections sur le futur niveau de l'océan, sont proposées par le GIEC à l'horizon 2090 selon les différents scénarios. La vitesse de variation est estimée à la fin du siècle entre 1,5 et 9,7 mm/an. Compte tenu de l'inertie des systèmes, ceci se traduirait par rapport à la situation actuelle par une augmentation à l'horizon 2040 compris entre + 4,5 cm et +20 cm. Notons que au niveau mondial, la période 1993/2003 avec +3,4 cm +/- 0,7 cm en 11 ans, s'est traduite par un rythme correspondant voire dépassant le domaine supérieur des modélisations en début de période.

Source
Giec



		B1		B2		A1B		A1T		A2		A1FI	
Thermal expansion	m	0.10	0.24	0.12	0.28	0.13	0.32	0.12	0.30	0.14	0.35	0.17	0.41
	mm yr ⁻¹	1.1	2.6	1.6	4.0	1.7	4.2	1.3	3.2	2.6	6.3	2.8	6.8
G&IC	m	0.07	0.14	0.07	0.15	0.08	0.15	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.17
	mm yr ⁻¹	0.5	1.3	0.5	1.5	0.6	1.6	0.5	1.4	0.6	1.9	0.7	2.0
Greenland Ice Sheet SMB	m	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.08	0.02	0.12
	mm yr ⁻¹	0.2	1.0	0.2	1.5	0.3	1.9	0.2	1.5	0.3	2.8	0.4	3.9
Antarctic Ice Sheet SMB	m	-0.10	-0.02	-0.11	-0.02	-0.12	-0.02	-0.12	-0.02	-0.12	-0.03	-0.14	-0.03
	mm yr ⁻¹	-1.4	-0.3	-1.7	-0.3	-1.9	-0.4	-1.7	-0.3	-2.3	-0.4	-2.7	-0.5
Land ice sum	m	0.04	0.18	0.04	0.19	0.04	0.20	0.04	0.20	0.04	0.20	0.04	0.23
	mm yr ⁻¹	0.0	1.8	-0.1	2.2	-0.2	2.5	-0.1	2.1	-0.4	3.2	-0.8	4.0
Sea level rise	m	0.18	0.38	0.20	0.43	0.21	0.48	0.20	0.45	0.23	0.51	0.26	0.59
	mm yr ⁻¹	1.5	3.9	2.1	5.6	2.1	6.0	1.7	4.7	3.0	8.5	3.0	9.7
Scaled-up ice sheet discharge	m	0.00	0.09	0.00	0.11	-0.01	0.13	-0.01	0.13	-0.01	0.13	-0.01	0.17
	mm yr ⁻¹	0.0	1.7	0.0	2.3	0.0	2.6	0.0	2.3	-0.1	3.2	-0.1	3.9

4.1.5 - Conclusion provisoire sur le niveau marin

Bien que souvent considéré comme le phénomène le plus spectaculaire en zone littorale, l'élévation du niveau de la mer est un fait constant depuis plus de deux cents ans avec un rythme qui au niveau côtier français serait jusqu'à présent de l'ordre de 1 à 2 mm par an.

Les premiers travaux sur l'estuaire montrent une valeur légèrement plus haute qui devra être confirmée par des travaux complémentaires envisagés avec la collaboration du PAB gestionnaire des marégraphes et celle de l'Université.

Du point de vue topographique cette élévation ne devrait pas se traduire à court terme par un bouleversement du trait de côte **estuarien** même si les effets sur la dynamique sédimentaire devront être évalués. Ces phénomènes de longue période apparaissent du moins pour les trois prochaines décennies, pour les acteurs techniques et scientifiques interrogés, comme de second ordre au regard d'autres enjeux tels que l'hydrologie, l'impact de tempêtes ou une gestion particulière des zones de marais et de leur défense contre l'érosion ou la submersion.

4.2 - Les données climatiques

4.2.1 - Données issue des mesures MétéoFrance

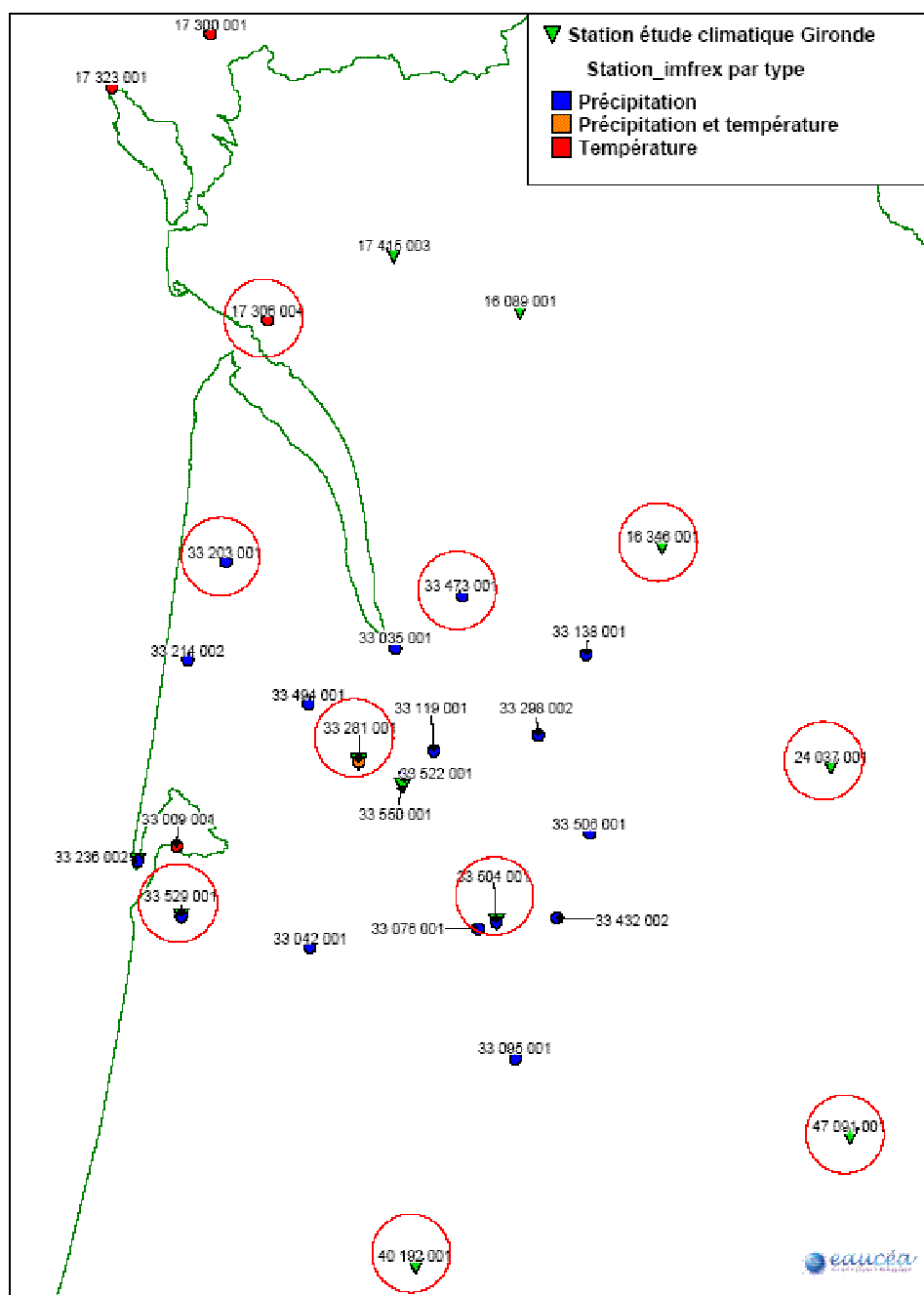
Les séries les plus longues de données sont maîtrisées par Météo-France, mais l'on trouve aussi deux sources de données complémentaires dans les chambres d'agricultures (réseau d'avertissement agricole) et à la communauté urbaine de Bordeaux qui suit depuis une vingtaine d'année les précipitations.

L'utilisation des données brutes pour détecter des évolutions nécessite cependant au moins deux qualités : la durée de la série (et idéalement sa pérennité pour le futur) et la stabilité des conditions de mesure (environnement de la station, matériel, etc,...). **La reconstitution de données ainsi sécurisées est un enjeu à part entière** de toutes les études s'intéressant au climat et qui recherche des évolutions du même ordre de grandeur que les ruptures potentiellement issues d'un problème « technique » de génération de la donnée.

Le parti pris de notre approche est donc de mobiliser des séries déjà sécurisées et qui permettront surtout des développements prospectifs avec des scénarios d'évolutions climatiques.

Les points d'analyse des données historiques sont choisis sur la base des stations qui ont fait l'objet d'un traitement correctif dans le cadre d'une étude en Gironde (« Homogénéisation et étude des longues séries de Températures sur le département de la Gironde – Octobre 2007 Météo France DIRSO). Cette sélection est complétée par

quelques stations référencées dans les bases de données IMFREX dont on doit souligner le très grand intérêt.



Carte des stations météorologiques ayant fait l'objet d'un traitement correctif dans des études récentes

Sur ces stations nous recherchons les chroniques journalières **longues périodes** :

- de température min/max/moy ;
- des précipitations totales ;
- de l'ETP.

4.2.2 - Problèmes posés

L'accès à ces données mesurées pose trois types de problèmes :

- Le premier est lié au coût d'accès des données. Une analyse sommaire montre que pour une station, une chronique de donnée mesurée sur 58 ans de données journalières pour un seul paramètre soit 850€ par paramètre. Si l'on retient 4 paramètres et 10 stations, c'est donc un investissement d'environ 34 000 € ;
- Le deuxième est lié à la disponibilité des « séries corrigées » et à leur actualisation qui nécessite un travail spécifique d'homogénéisation de la part de Météofrance (repérage des ruptures).
- Le dernier problème vient de la diffusion de ces données, et des obligations à respecter notamment pour alimenter un site grand public.

Il serait intéressant de distinguer dans les paramètres, ceux dont la représentativité en terme de variabilité relative peut être obtenue avec un nombre limité de station (par exemple la température et l'ETP) et ceux dont le caractère fortement local, impose un échantillon diversifié (par exemple précipitation). Ce parti pris, devrait pouvoir être argumenté par les spécialistes du climat ce qui pourra guider les maîtres d'ouvrages dans le choix du « panier des informations pertinentes ».

Sur le plan méthodologique et afin de pouvoir avancer dans le cadre de cette étude, nous avons retenus trois approches complémentaires :

- La prise en compte de l'étude pour le Conseil Général de Gironde effectuée par Météo France ;
- La récupération de données graphiques sur le site Imfrex malheureusement arrêté en 2000 ;

4.2.3 - Données issues de scénarios climatiques applicables au territoire de l'estuaire

4.2.3.1 Le programme IMFREX,

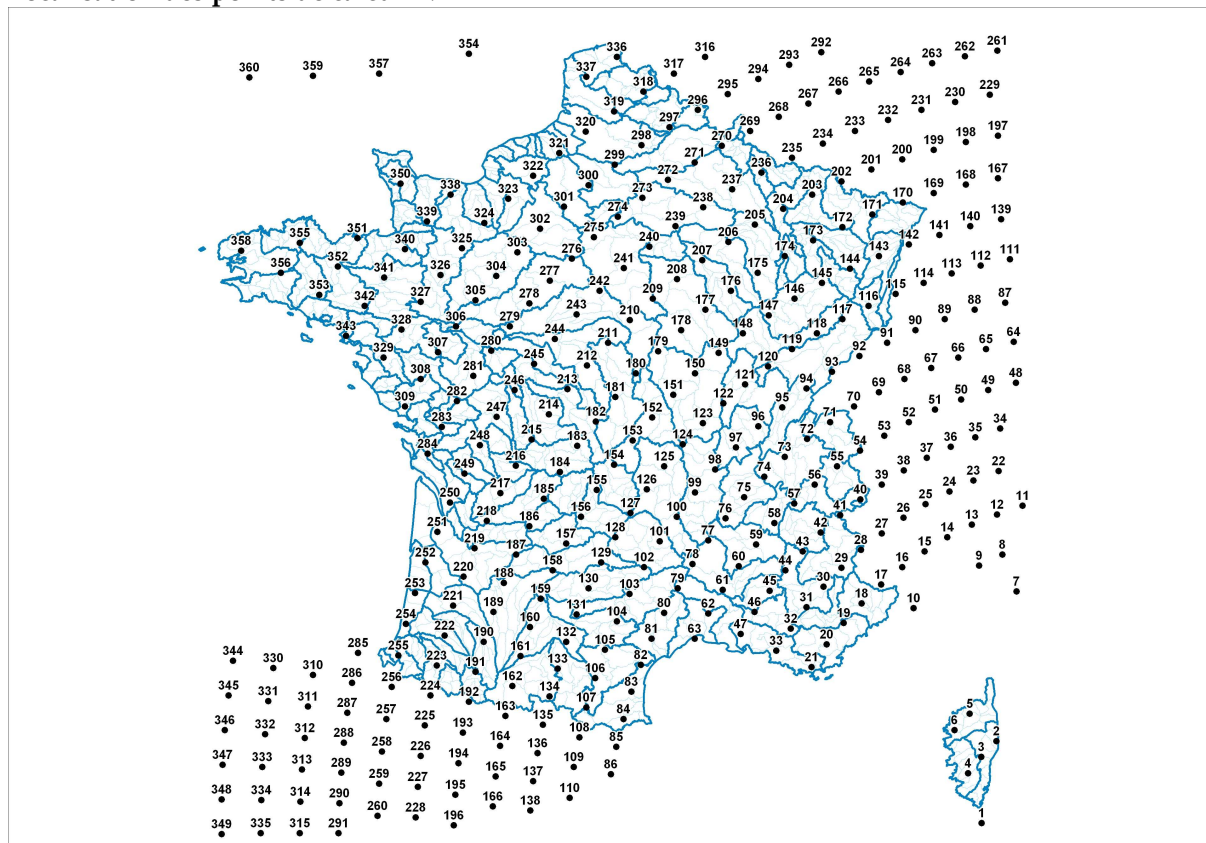
Les données disponibles correspondent aux points de calcul repérés sur la carte ci-dessous (maillage de 50 à 60 km sur la France). Les données modélisées (36 paramètres) sont disponibles pour différents scénarios climatiques et au pas de temps journalier sur les périodes :

- Passé Modèle _ DA9, DE3, DE4 simulations de référence sur 40 ans (1/1/1960 -> 31/12/1999).
- Scénario GIEC A2 _ Modèle DE6, DE7, DE8 scénarios sur 30 ans (1/1/2070 -> 31/12/2099) 1960/2000 et 2070/2100.

Nous avons développé un utilitaire de mobilisation de cette information permettant de générer sous Microsoft Excel des chroniques associées à chaque point du réseau choisi. Les restitutions sous forme de chroniques journalières doivent être appréciées pour ce qu'elles sont, c'est-à-dire non pas des années calendaires réelles mais plutôt des années modèles.

Le problème des données de simulation pour le futur vient de la non adéquation avec la période visée dans cette étude (horizon un peu trop lointain pour le gestionnaire).

Localisation des points de calcul IMFREX



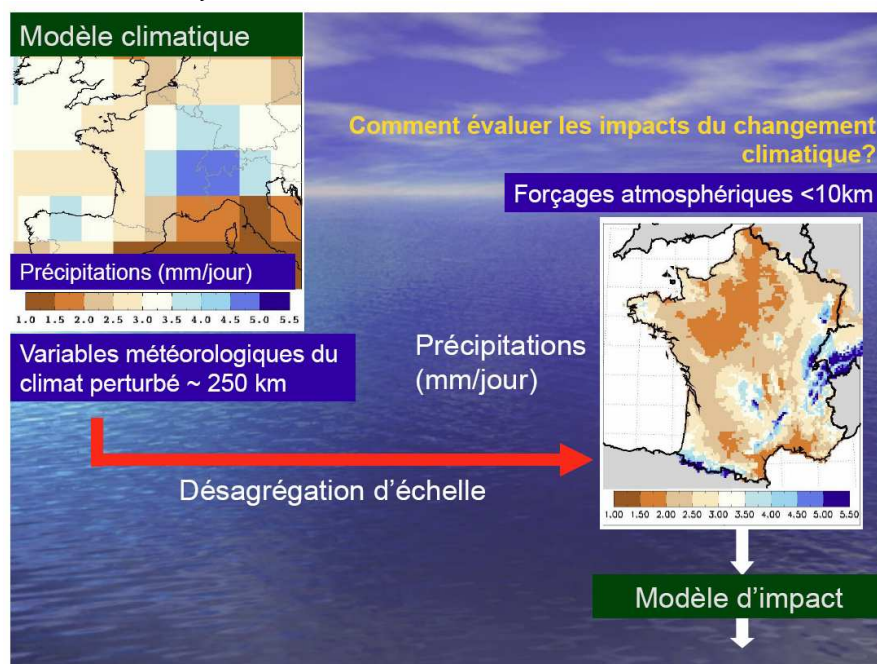
4.2.3.2 Les données de simulations régionalisées Cerfacs

L'objectif des méthodes de régionalisation est d'évaluer les changements climatiques avec une distribution géographique beaucoup plus fine (maillage Safran 8 km). Cette étape est d'un grand intérêt pour l'analyse détaillée du territoire. Les chroniques proposées sont elles aussi beaucoup mieux adaptées à notre préoccupation d'une gestion prospective du court et moyen terme puisque ce sont les seules disponibles à ce jour pour traiter du champ proche.

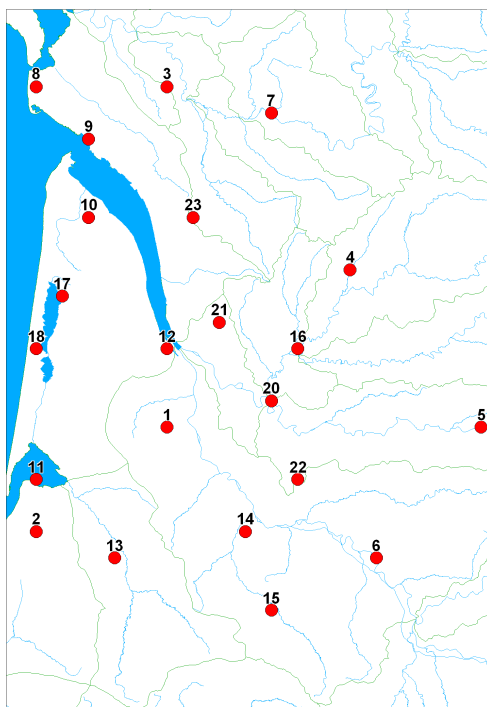
La valorisation des données de simulation peut être conduite avec deux optiques :

- Soit analyser et illustrer l'évolution des phénomènes climatiques (par exemple l'évolution des températures)
- Soit s'intégrer dans des modèles d'impacts (par exemple simulation de la température de l'estuaire).

Illustration Cerfacs



Localisation des stations Cerfacs mobilisées



Notons que les modélisations transmises par le Cerfacs, génèrent des séries de données historiques fictives et qui pour la période historique doivent par construction recouper les données issues du modèle Safran. Les données SAFRAN sont des sorties de modèles de prévision qui sont ré-analysées en tenant compte des observations, des champs analysés par le centre européen, ou qui sont issues du modèle ARPEGE5, et qui subissent une interpolation optimale prenant en compte le relief. Toutes les variables météorologiques classiques (pluie, température, vent, rayonnement...) sont ainsi estimées toutes les 3h et affectées à une zone définie comme climatiquement homogène de 8x8 km. Ces produits élaborés par Météo-France permettent d'avoir une couverture complète de la France sur une période allant de 1970 à 2005.

Description des scénarii climatiques SCRATCH08

Un ensemble de scénarii ou projections climatiques réalisés dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC a été désagrégé à une résolution de 8 km sur une région couvrant la France et une partie de la Suisse. La méthodologie de descente d'échelle utilisée est celle développée par Julien Boé au CERFACS (Boé et al. 2006 ; Boé 2007). Cette méthodologie est une désagrégation d'échelle statistique multivariée qui repose sur l'utilisation du concept de type de temps et qui est dérivée de la méthode classique des analogues. Les propriétés climatiques régionales sont utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour une variable locale donnée (les précipitations pour les scénarii SCRATCH08). L'hypothèse principale est que chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle $\equiv$ le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à petite échelle $\equiv$ le/les prédictant(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou réanalyses disponibles.

Les jeux de données utilisés pour construire la fonction de transfert sont d'une part l'analyse météorologique à méso-échelle SAFRAN développée à Météo-France (pour les prédictants) et d'autre part la réanalyse météorologique du National Center for Environmental Prediction – NCEP (pour les prédicteurs). L'analyse SAFRAN couvre la France sur une période allant de 1970 à 2005 à une résolution spatiale de 8 km (zones climatiques cohérentes) sur une grille régulière en projection Lambert-II étendue. Elle comporte 7 paramètres, soient : les précipitations solide et liquide, la température à 2 m, le module du vent à 10 m, la radiation infra-rouge et visible incidente en surface, l'humidité spécifique à 2 m. Les scénarii climatiques désagrégés contiennent en plus de ces 7 variables l'évapotranspiration potentielle, l'humidité relative (moyenne, minimale et maximale), les températures minimale et maximale. Les variables sont fournies à l'échelle journalière.

Les scénarii climatiques qui ont été désagrégés proviennent de 15 modèles utilisés pour le 4^{ème} rapport du GIEC (forcé par le même scénario d'évolution des gaz à effet de serre GES, le scénario médian A1B). Un jeu additionnel de 3 scénarii réalisés à Météo-France à l'aide du modèle ARPEGE (voir ci-dessous) avec différents scénarii d'évolution des GES a également été désagrégé. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des simulations désagrégées disponibles.

SCRATCH08 : SCénarii Régionaux Adaptés à l'Étude des CHangements climatiques 2008

Modèles du GIEC	Scénario GES	Période couverte	Centre climatique
CCCMA CGCM3.1 T63 CNRM-CM3 CSIRO-MK3.0 GFDL-CM2.0 GFDL-CM2.1 GISS-AOM GISS-ER IAP-FGOALS INGV ECHAM4 IPSL CM4 MIROC3.2 MEDRES MIUB ECHO-G MPI-ECHAM5 MRI CGCM 2.3.2a NCAR CCSM3	GES Observé + A1B	01/01/1961-31/12/2000 01/01/2046-31/12/2065 01/01/2081-31/12/2100	CCCMA (Canada) Météo-France CSIRO (Australie) GFDL (USA) GFDL (USA) GISS (USA) GISS (USA) FGOALS (Chine) INGV (Italie) IPSL (France) MIROC (Japon) MIUB (Allemagne) MPI (Allemagne) MRI (Japon) NCAR (USA)
Modèle ARPEGE			
ARPEGE version4	GES Observé	01/01/1950-31/12/2000	Météo-France
ARPEGE version4	B1	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France
ARPEGE version4	A1B	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France
ARPEGE version4	A2	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France

Références:

- J. Boé, L. Terray, F. Habets, and E. Martin: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. J. Geophys. Res., 111 :D21106, 2006.
- J. Boé. Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007.
- C. Pagé, J. Boé, L. Terray : Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France, 2008

Dans la présente étude, nous avons testée 4 simulations Arpège3 GES A1B mis à disposition par le Cerfacs et seules simulations disponibles couvrant la période 2000/2040

4.2.3.3 Quantification de l'incertitude des scénarii désagrégés (chapitre rédigé par Christian Pagé-Cerfacs)

La question des incertitudes est devenue une des questions centrales autour de l'utilisation des scénarii ou projections climatiques pour les études d'impact. Les sources d'incertitude présentes dans tout exercice de projection climatique à échelle fine sur le 21^{ème} siècle sont multiples et il est essentiel de toujours bien garder en mémoire les limitations inhérentes à l'exercice de projection climatique dans le futur.

L'identification et la quantification des sources d'incertitudes inhérentes aux projections climatiques reposent principalement à l'heure actuelle sur l'existence d'ensembles de scénarii plus que sur une démarche véritablement concertée. Les incertitudes peuvent se catégoriser comme suit:

- L'incertitude réflexive, qui est liée aux scénarii futurs d'émission des gaz à effet de serre;
- L'incertitude modèle, qui est liée à une connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation approximative dans les modèles;
- L'incertitude stochastique, qui est liée à la variabilité climatique intrinsèque et chaotique et qui comprend également la problématique des conditions initiales du système climatique modélisé.

Les scénarii utilisés dans le présent projet exploitent une partie de la base de données CMIP3 ainsi que la réalisation de simulations régionales réalisées à Météo-France et au CERFACS avec le modèle ARPEGE en mode étiré sur l'Europe et la Méditerranée. Ils permettent ainsi de donner une première estimation de certaines des sources d'incertitude. La considération de la base CMIP3 donne la dispersion associée au multi-modèle du GIEC et fournit une estimation approximative de la combinaison des incertitudes modèle et stochastique. L'estimation de l'incertitude reliée directement aux concentrations de gaz à effet de serre provient de deux scénarii ARPEGE Météo-France réalisés avec les deux scénarii SRES A1B et A2.

Par contre, il est difficile de quantifier ou même d'encadrer (borner) précisément les différentes sources d'incertitude. La seule alternative pratique actuellement est donc de travailler avec ces ensembles pour obtenir une première estimation des incertitudes. Enfin, il est à souligner que si les études de vulnérabilité n'exigent pas une approche ensembliste (on peut très bien faire une étude de vulnérabilité avec un seul scénario idéalisé), toute étude de risque présuppose l'utilisation des probabilités et la prise en compte des différentes sources d'incertitude.

4.2.4 - Synthèse sur les informations climatiques mobilisées dans cette étude (mai 2008)

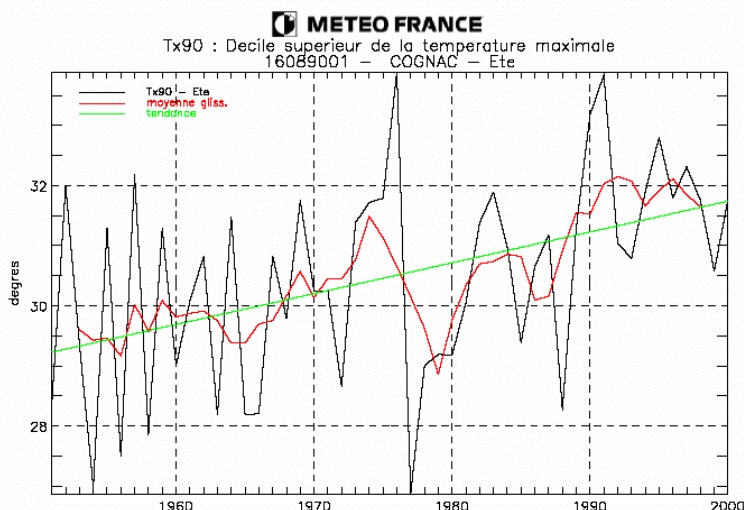
Le tableau ci-dessous restitue le niveau d'information mobilisable avec, en rouge absence de donnée, en orange une disponibilité partielle et en vert une bonne disponibilité. Un rapport spécifique traite des indicateurs.

Les indicateurs tendanciels du changement climatique				Disponibilité					
	Source	Avantage	Limite	<1900	1900 à 1950	1950 à 2000	2000 à 2008	2008 à 2040	2040 à 2100
Les paramètres de premier niveau									
Températures de l'air:	Météo France	Diversifié	Actualisation nécessite une homogénéisation						
	Cerfacs	Régionalisé Ciblé sur le territoire et la période	Données issues de modèle						
	CNRS (IMFRET)	Référence "fiable" et gratuite	Données issues de modèle						
Température de l'eau océanique	Ifremer, Somlit	Disponible							
Température de l'eau de Gironde, Garonne, Dordogne	RNB agence de l'eau, Migado	RNB depuis 1970 + Somlit	Discontinu						
Niveaux des eaux : au Verdon, dans l'estuaire	PAB SHOM	Disponible	Interprétation non prise en charge						
Précipitations :	Météo France	Disponible et saison	Actualisation nécessite une homogénéisation						
	CUB	41 stations disponibles Orage	Chronique depuis 2000						
	Cerfacs	Ciblé sur le territoire et sur la période	Données issues de modèle						
	CNRS (IMFRET)	Référence "fiable" et gratuite	Données issues de modèle						
Tempêtes :	Météo France		Pas de référentiel						

4.2.5 - Températures

4.2.5.1 Les tendances historiques

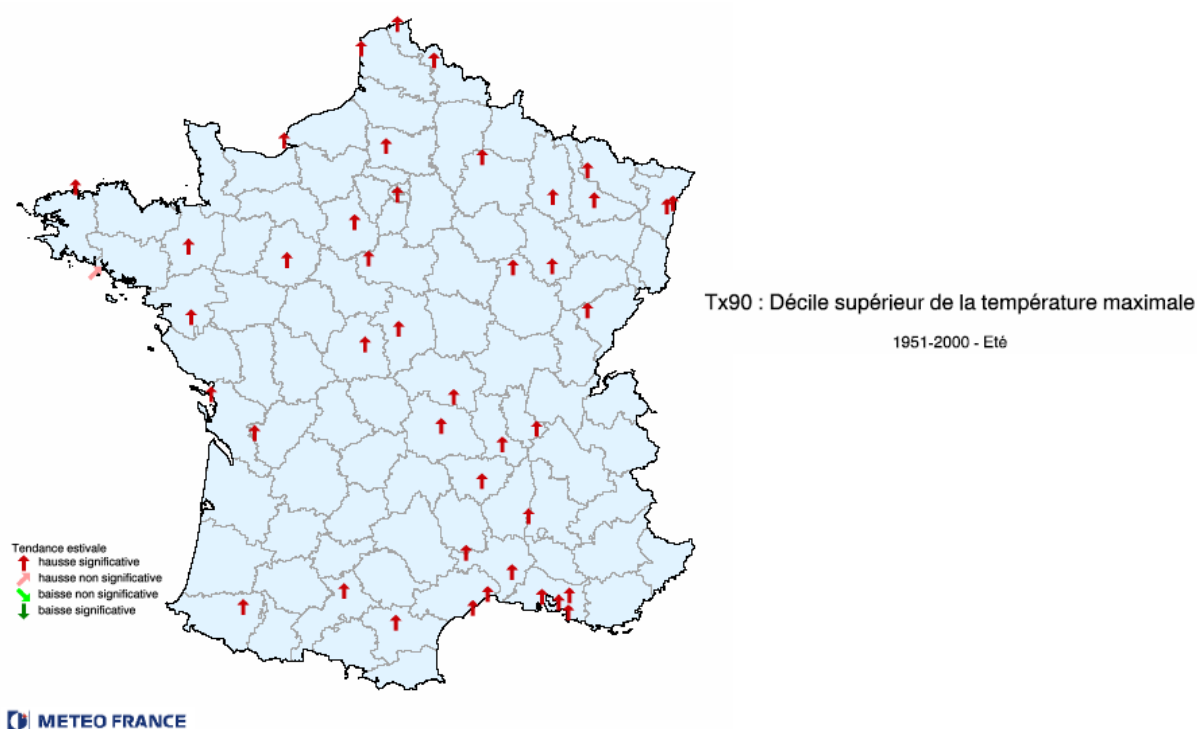
Sur le plan des températures, et depuis 1950, les tendances des températures minimales moyennes annuelles sont de l'ordre de + 0,26 °C par décennie et pour les températures maximales moyennes annuelles de l'ordre de + 0,30 °C par décennie soit une moyenne de l'ordre de 2,8°C par siècle. L'augmentation s'observe en réalité depuis le début du XX^{ème} siècle sur les stations de Royan et de Mérignac mais avec manifestement un accroissement pour les températures maximales après les années 1950 qui se traduit dans les deux sources d'informations disponibles par des tendances séculaires



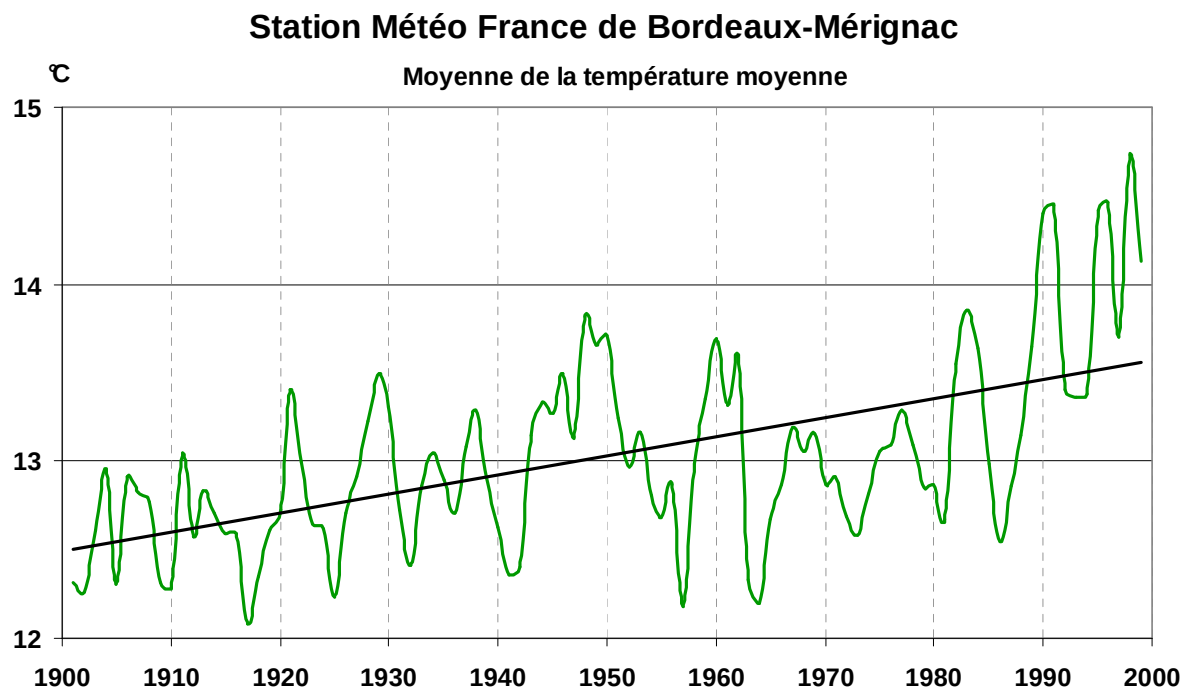
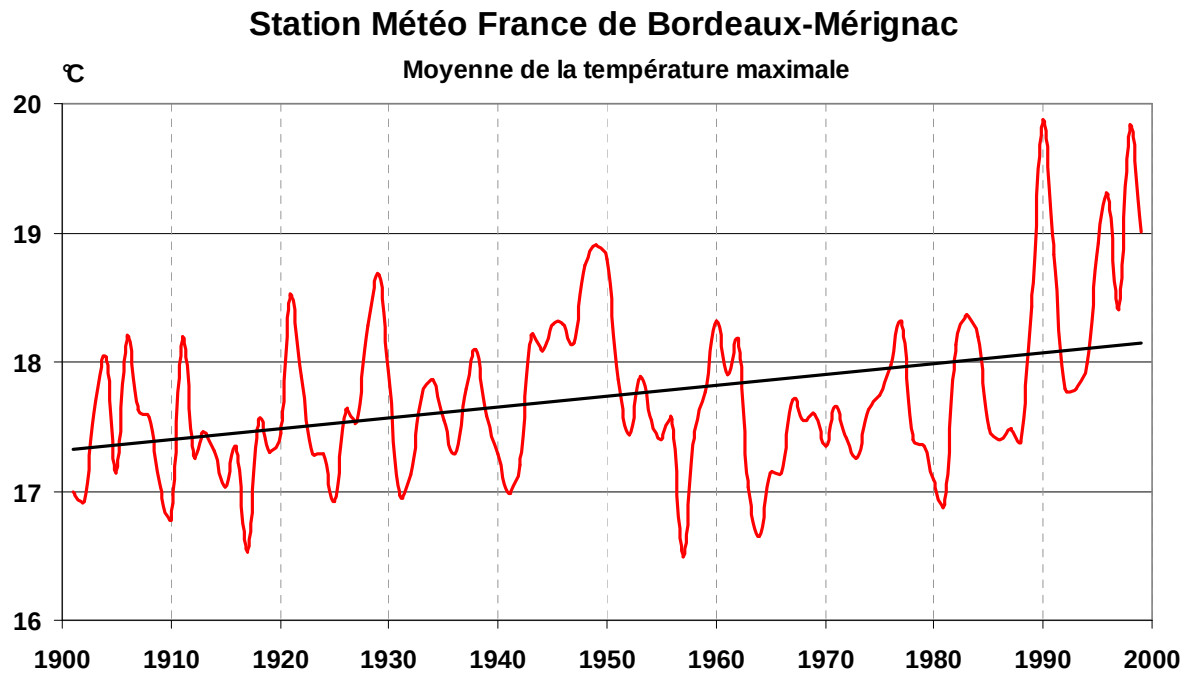
différentes selon la série analysée (+1,2°C « seulement » sur la série 1900/2000). Cette accélération est en soi un phénomène très marquant et qui recoupe assez bien les analyses climatiques plus globales. Au niveau mondial le 4^{ème} rapport du GIEC relève la même tendance mais avec une amplitude moitié moins grande « La vitesse moyenne du réchauffement au cours des cinquante dernières années (0,13 (0,10 à 0,16) °C par décennie) est environ le double de la pente moyenne pour les cent dernières années. L'augmentation totale de température de 1850-1899 à 2001-2005 est de 0,76 (+ ou -0,19)°C. ».

Ce distinguo pose cependant des questions lourdes de sens d'un point de vue écologique car la vitesse de variation est sans doute un facteur aussi important que la variation elle-même.

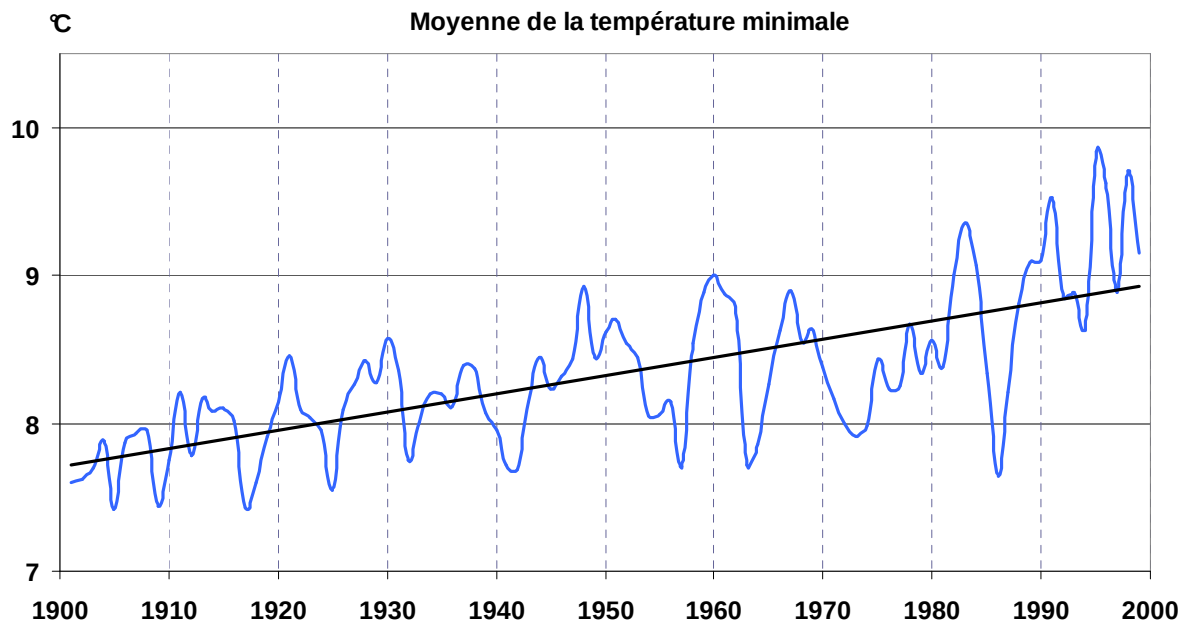
Par ailleurs, on note au niveau national et sur les 50 dernières années une augmentation systématique des températures estivales maximales. La canicule 2003, n'aura fait que confirmer cette tendance lourde.



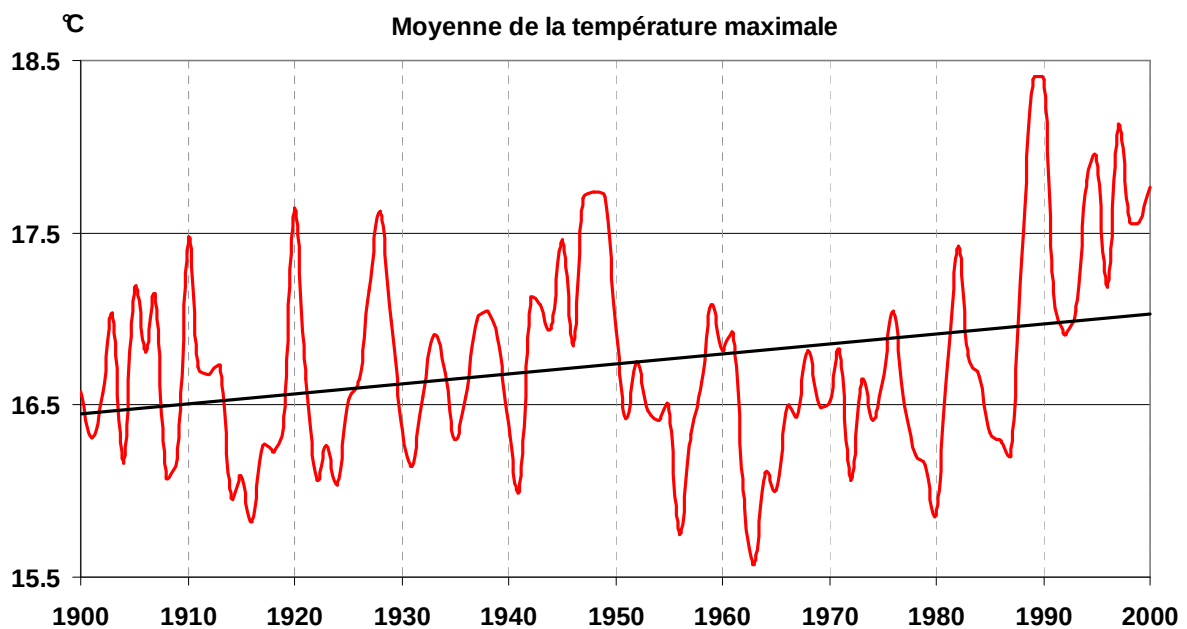
Données Imfrex :
En 100 ans à Mérignac et Royan
 $T_{min} \approx +1.3^{\circ}\text{C}$
 $T_{max} \approx +1.0^{\circ}\text{C}$
 $T_{moy} \approx +1.2^{\circ}\text{C}$

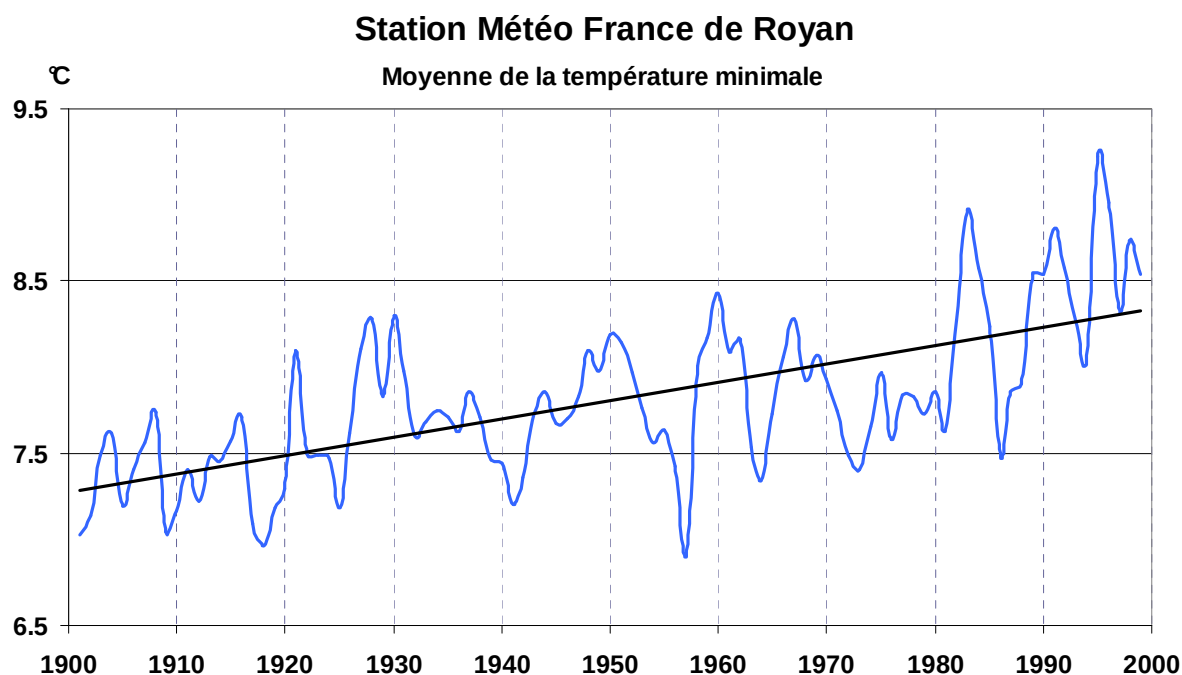
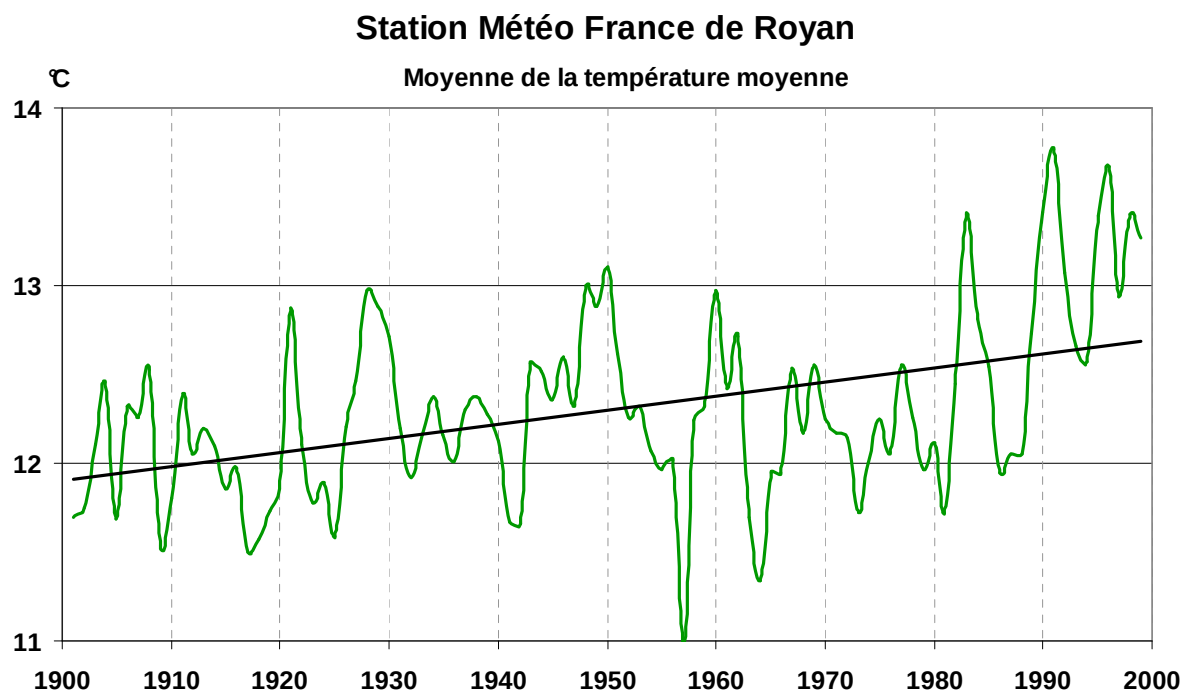


Station Météo France de Bordeaux-Mérignac



Station Météo France de Royan





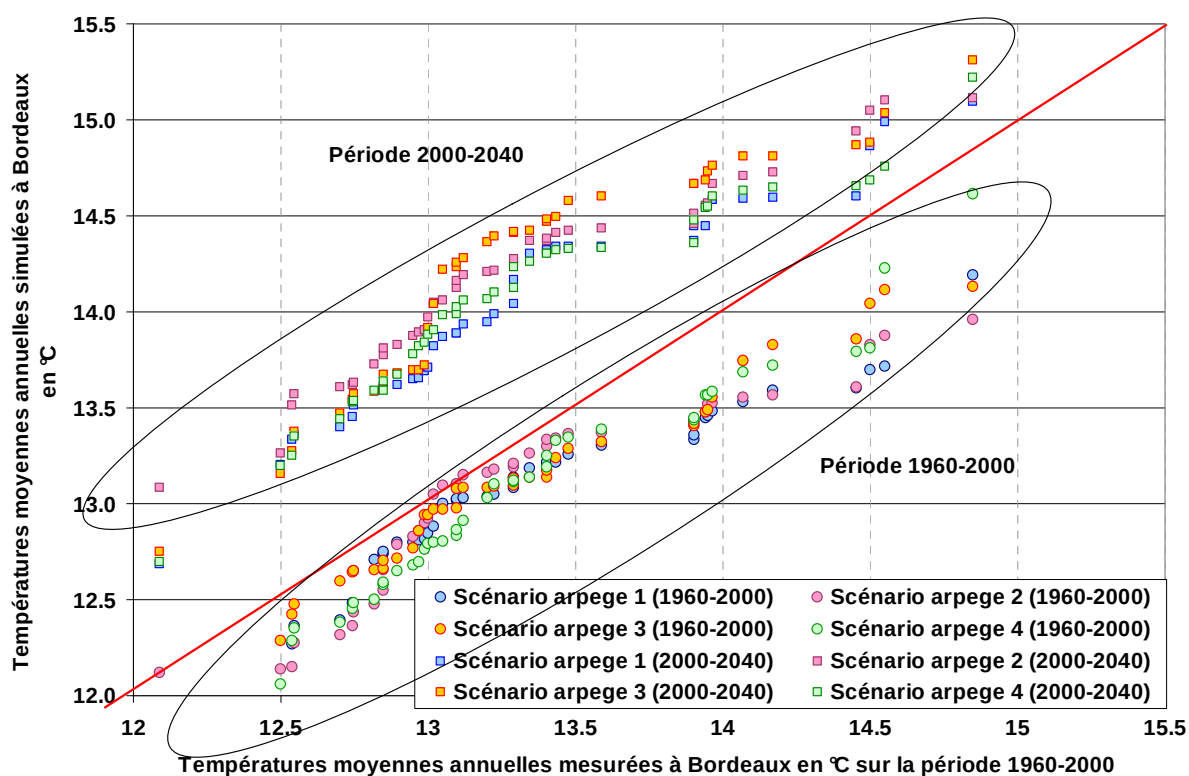
4.2.5.2 Demain la température

Les chroniques proposées par le Cerfacs, décrivent pour chaque paramètre un domaine d'incertitude liée aux permettant de relativiser le niveau d'information qui est, comme pour Imfrex, restitué au pas de temps journaliers. L'attention du lecteur est à nouveau attirée sur la nuance forte entre année de simulation et année calendaire. Seules les approches statistiques et tendancielle ont du sens, même si

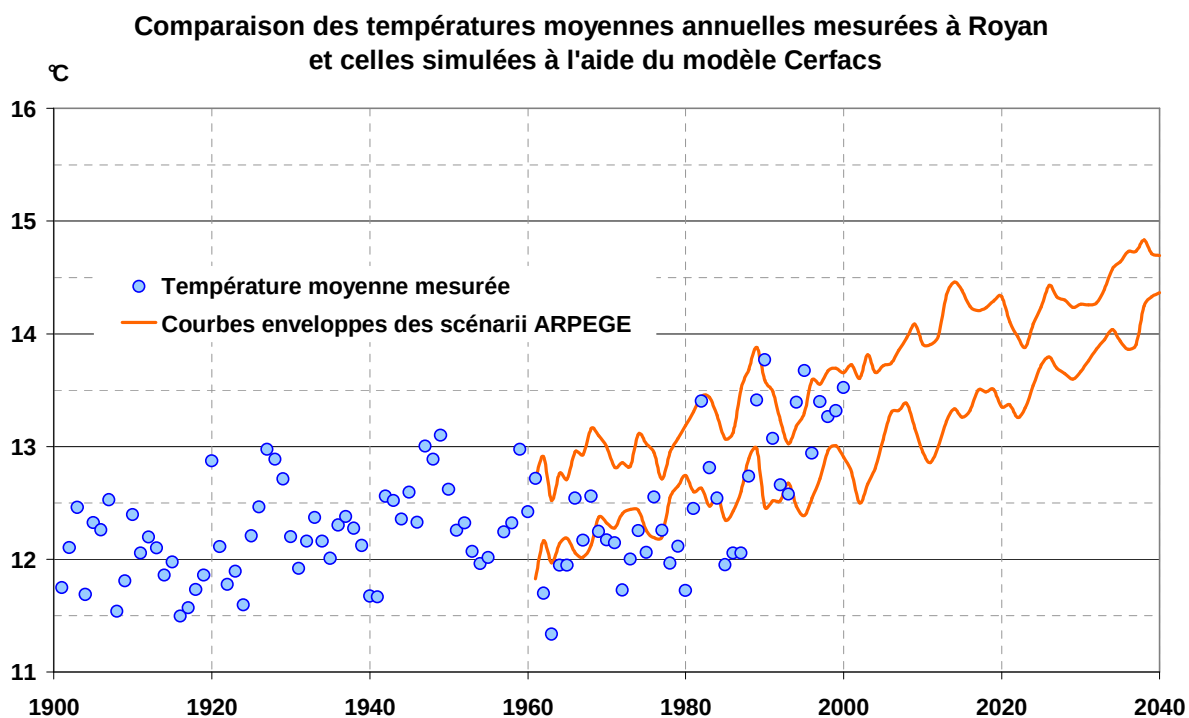
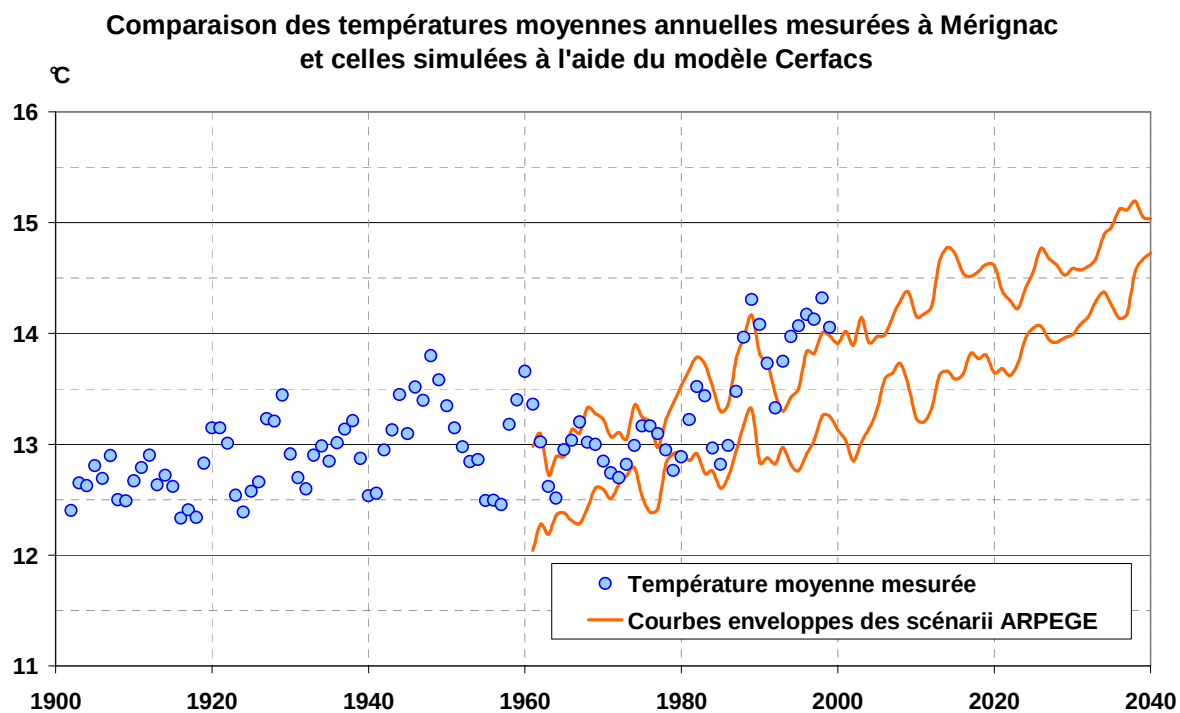
pour la commodité des représentations grand public la dimension dynamique de l'évolution des chroniques de paramètres apparaît plus immédiatement interprétable.

Le graphe ci-dessous est une analyse comparant les résultats des simulations le plus proche de Bordeaux-Mérignac aux données mesurées à Bordeaux (en l'absence de données du point Safran correspondant). Une adéquation parfaite entre les séries mesurées se serait traduite par un alignement parfait des points (symboles ronds) sur la diagonale. Toutes les températures moyennes apparaissent légèrement inférieures dans le point Safran simulé (en particulier les températures moyennes annuelles les plus élevées) mais la description d'ensemble est cohérente avec la mesure. Les simulations traduisent donc correctement la diversité des situations thermiques enregistrées entre 1960 et 2000.

La projection du futur (symbole carré), montre clairement un décalage vers le haut d'environ 1°C dans la période 2000-2040. C'est cette évolution relative qui est le paramètre le plus pertinent de la simulation.



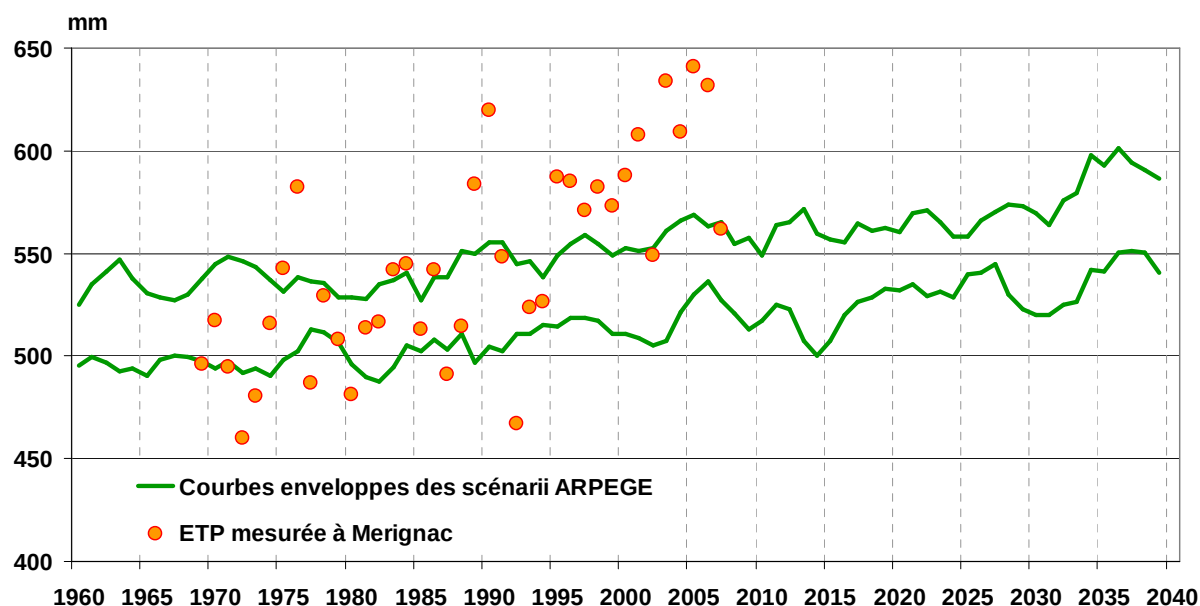
L'évolution simulée montre une prolongation des tendances récentes avec environ +1°C d'ici 2040 tant à Bordeaux qu'à Royan.



4.2.6 - Evapotranspiration

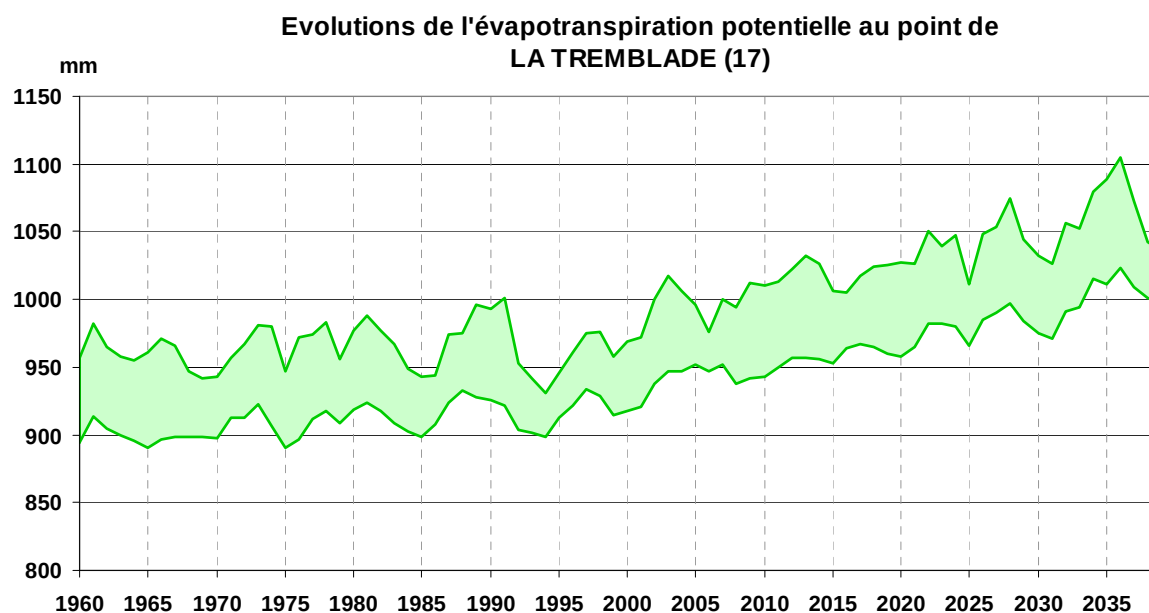
L'évapotranspiration est sur le plan des ressources en eau, l'un des plus importants facteurs puisqu'elle peut impacter lourdement la végétation, qu'elle régit les transferts vers les rivières et les nappes souterraines et enfin peut induire un appel à renforcer l'irrigation pour l'agriculture. Il est remarquable que pour ce paramètre les valeurs observées dans la dernière décennie sont significativement plus élevées que les tendances simulées. Sur le plan agricole et notamment en Gironde, la demande en eau des plantes a effectivement atteint des niveaux record.

Comparaison de l'ETP estivale mesuré à Mérignac et celles simulées à l'aide du modèle Cerfacs



Au niveau annuel, cette tendance lourde pourrait avoir des répercussions sur le cycle de l'eau en milieu forestier en fin d'hiver et au printemps mais aussi en automne.

Cette tendance se retrouve sur le secteur côtier comme le montre le graphe (en valeur annuelle) établi sur le secteur de la Tremblade.



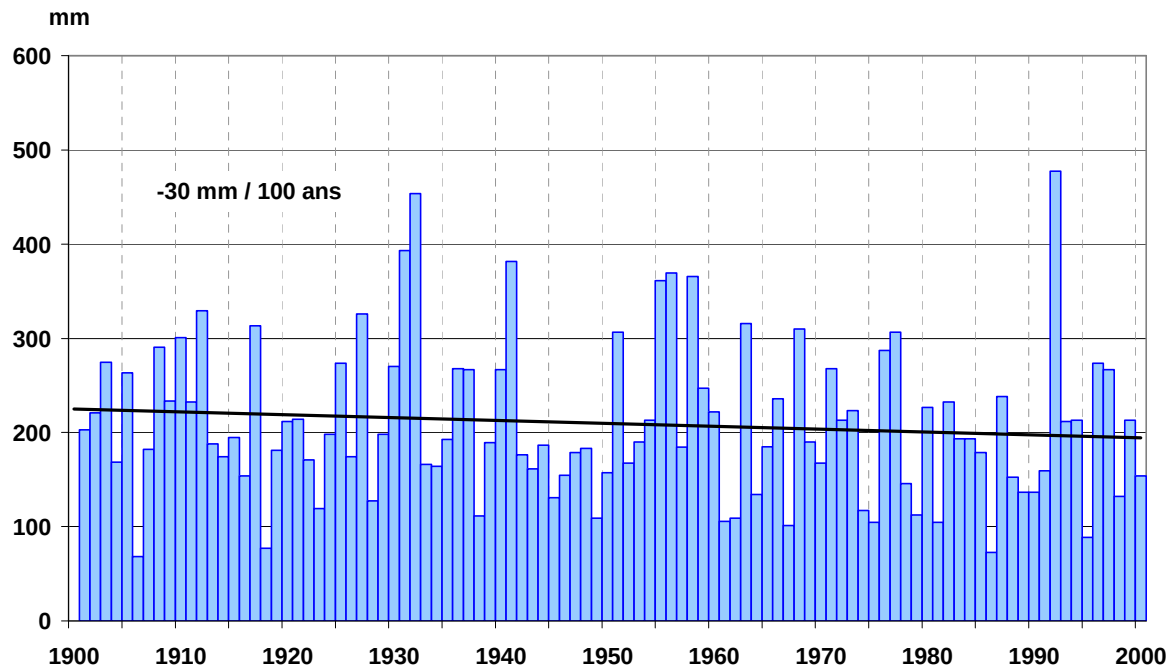
4.2.7 - Précipitations moyennes annuelles et estivales

4.2.7.1 Les tendances historiques

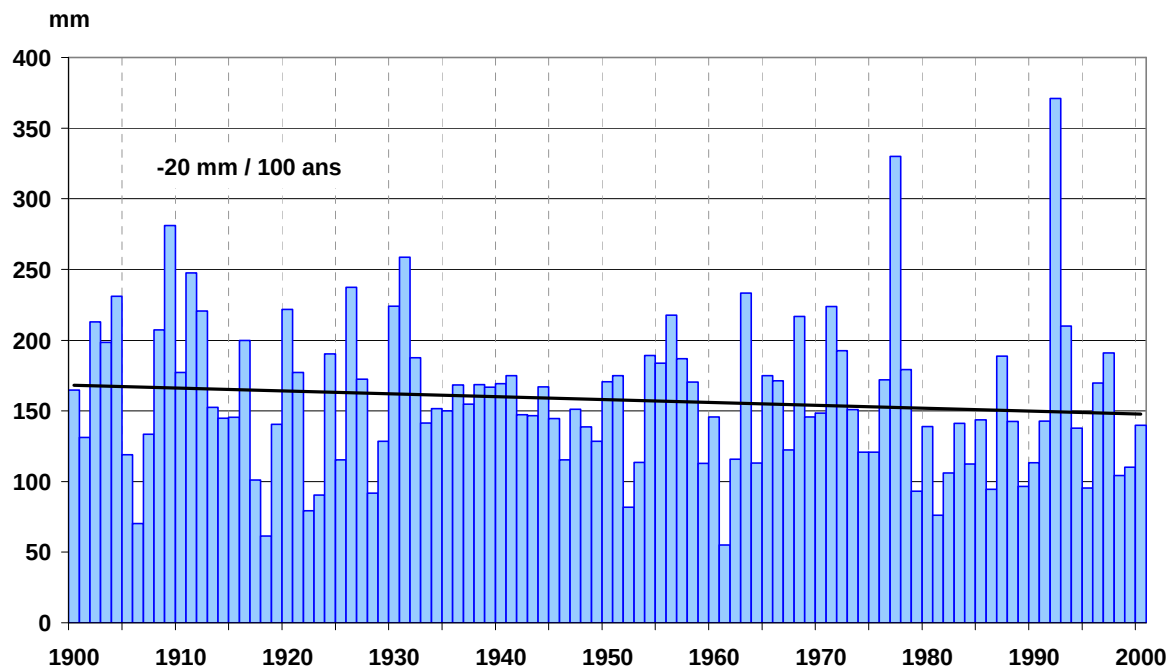
Les précipitations envoient un signal très peu marqué sur le plan tendanciel. Ainsi à Bordeaux, l'évolution longue durée serait relativement stable avec même un léger accroissement des précipitations (+40 mm en 100 ans) mais sans que cette tendance ne se retrouve partout ni qu'elle puisse être confirmée dans la dernière décennie. Ainsi à Hourtin, aucune tendance séculaire ne se distingue.

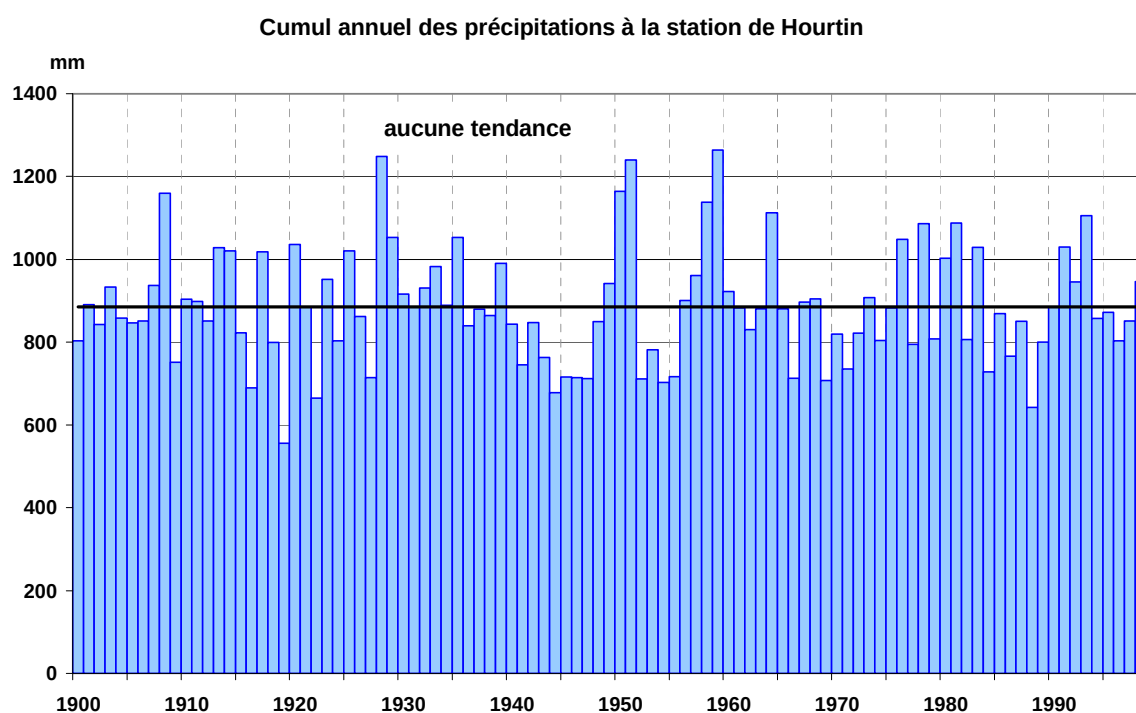
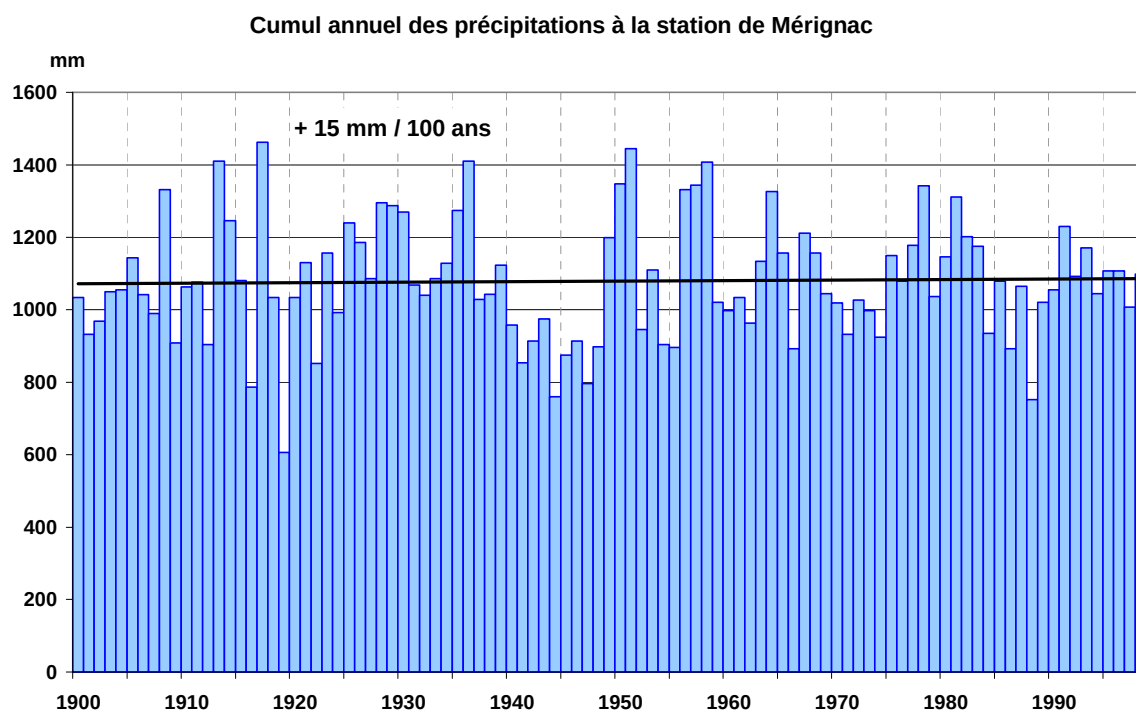
En été, la situation apparaît plus marquée avec une tendance à la baisse du volume précipité sur les mois de juin, juillet et août. Cette période est particulièrement sensible pour le cycle de la végétation et en particulier pour les cultures dites d'été (maïs par exemple) mais aussi pour la forêt. Cette tendance représenterait à Bordeaux environ 30 mm en 100 ans soit -13% ou l'équivalent d'une semaine de demande en eau des plantes.

Cumul estival des précipitations à la station de Mérignac



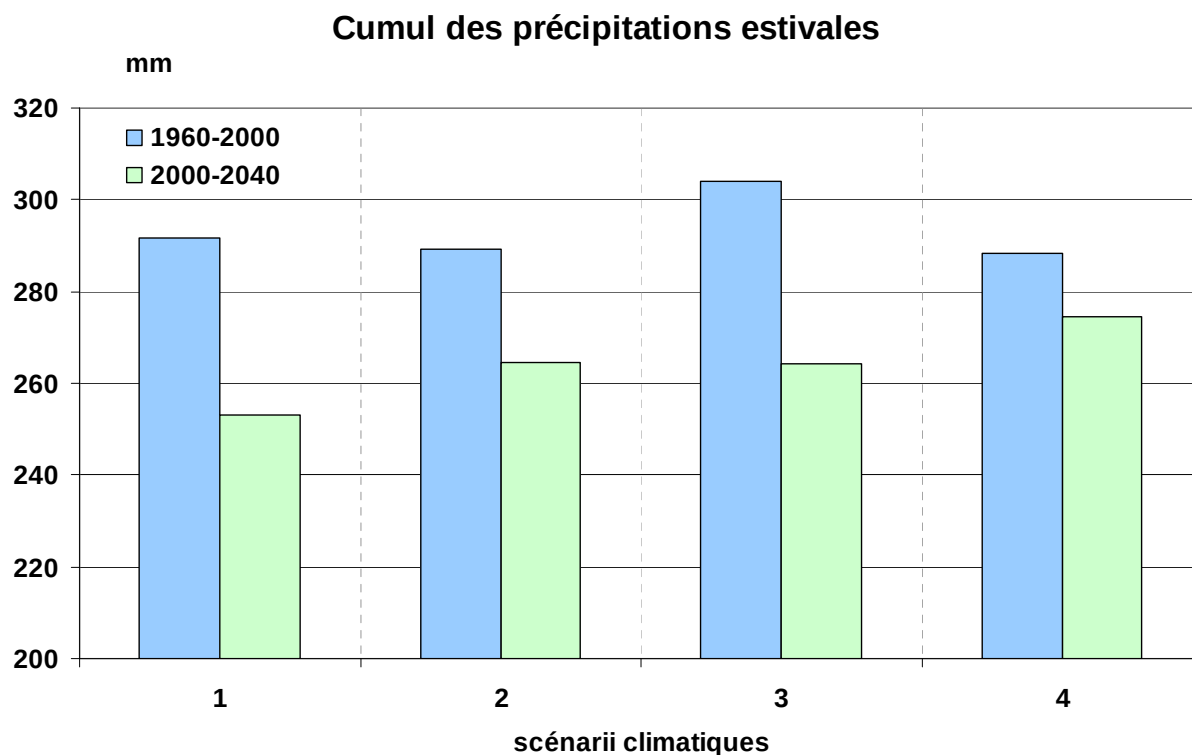
Cumul estival des précipitations à la station de Hourtin



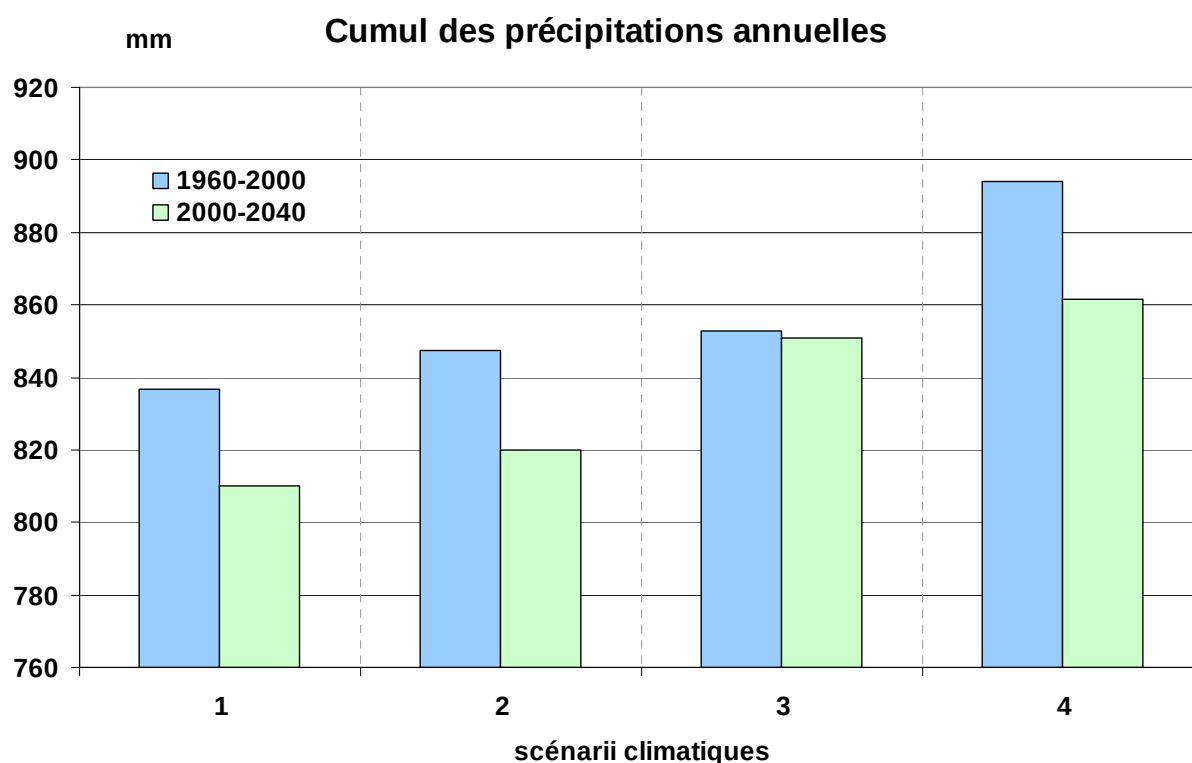


4.2.7.2 Demain les précipitations

Pour la période 2000/2040 Les 4 scénarios issus de Scratch08 conduisent tous à une légère réduction des précipitations estivales avec entre -40 et -10 mm soit environ 10% de moins par rapport à la période 1960/2000.



Pour les précipitations annuelles l'écart est identique en valeur absolue, voire légèrement inférieur mais toujours dans des proportions modestes en valeur relative.

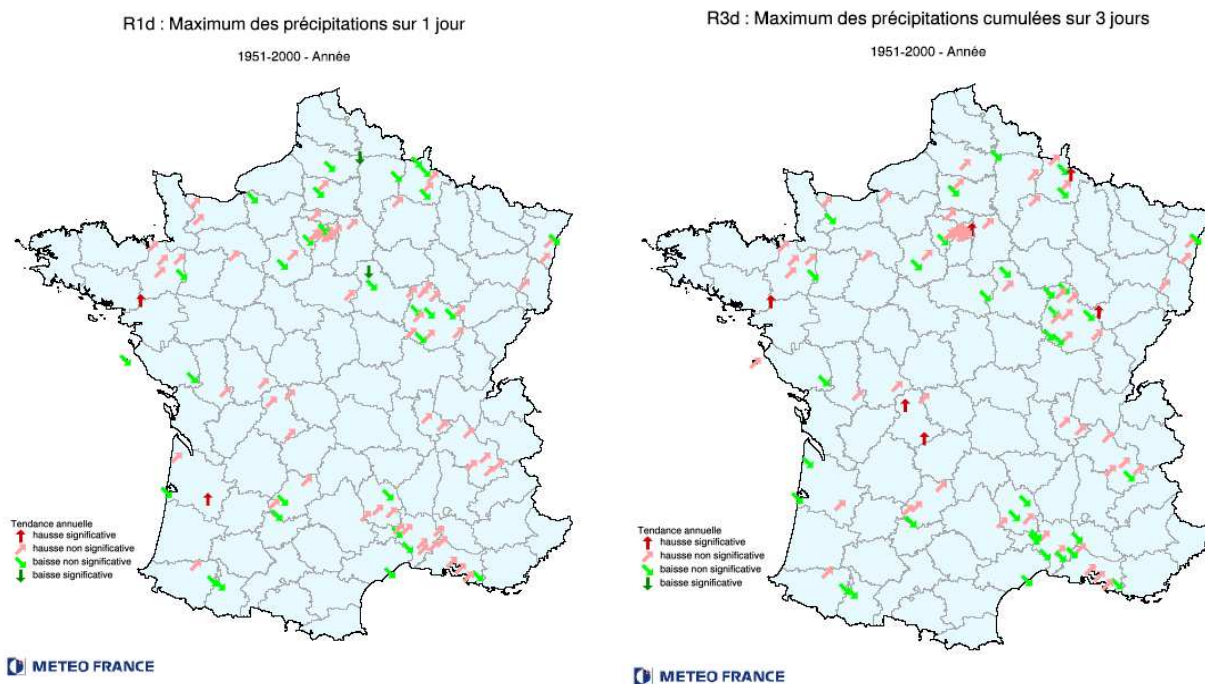


4.2.8 - Précipitations maximales journalières

Les valeurs de précipitations les plus fortes sont en lien étroit avec les événements de crue et donc d'inondation. Sur le périmètre d'étude, les inondations peuvent toucher des agglomérations (crues urbaines très sensible à l'imperméabilisation), de petits

bassins versants souvent forestiers qui s'ouvrent sur des zones de marais ou encore les grands bassins de la Dordogne et de la Garonne. La difficulté d'une étude tendancielle des précipitations à risque de crues vient du fait que les événements à risque sont très rares.

Le meilleur facteur d'analyse à notre disposition vient du suivi des cumuls précipités sur 1 jour (crue locale) ou 3 jours (crue généralisée). Les cartes ci après traduisent des tendances peu marquées ou contradictoires.



Pour les pluies les plus intenses sur de courtes durées et compte tenu de ce contexte incertain pour les pluies journalières ou sur trois jours, il serait intéressant de pouvoir accéder **aux statistiques de pluies instantanées qui servent à construire les courbes Intensité Durée Fréquence et qui sont appuyées sur le coefficient de Montana**. Remarquons cependant que les données sur les pluies décennales (à forte valeur prescriptive pour la gestion des eaux pluviales urbaines) sont par définition entachées d'une incertitude importante due au fait que la période d'observation est alors du même ordre de grandeur que la période de retour de la pluie.

4.2.9 - Les tempêtes

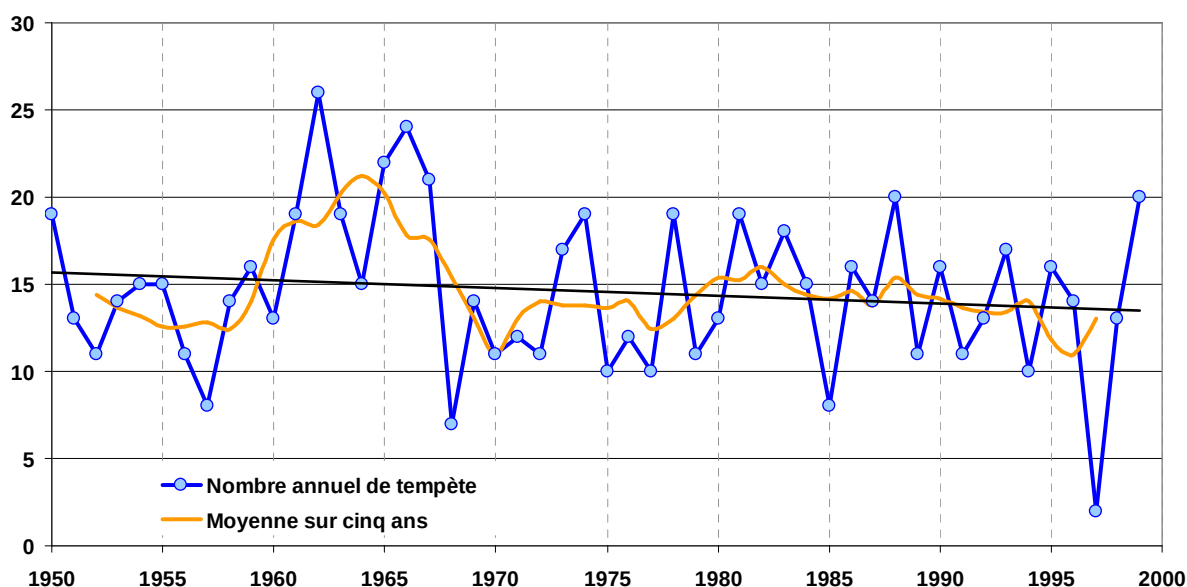
Force d'une tempête

L'échelle de Beaufort est adoptée à l'échelle internationale par les marins pour caractériser la force du vent. Le qualificatif de «tempête» s'applique pour des vents moyens à 10 m (moyennés sur 10 minutes) compris entre 89 et 102 km/h (force 10), celui de «forte tempête» à la gamme 103 à 117 km/h (force 11) et celui d'«ouragan» (force 12) au-delà. La notion de tempête implique également une certaine extension spatiale. En France, le seuil retenu par les assureurs pour indemniser les dégâts dus au vent est de 100 km/h en vitesse de vent instantané (intégré sur 0,5 s). Le rapport entre vent instantané ainsi défini et vent moyen sur 10 minutes est de l'ordre de 1,6 à 1,9.

Extrait de la Lettre n°15 Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PIGB-PMRC)

Il ne semble pas qu'au niveau français, cet indicateur ait beaucoup évolué sachant que les tendances observées n'ont pour l'instant pas de signification statistique. Météo France développerait depuis 1999 une «Base de Données d'Evénements Marquants», incluant la documentation d'événements historiques remontant jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, et parfois au-delà (Bessemoulin).

Nombre de tempêtes observées chaque année en France entre 1950 et 1999



Sur le plan prospectif, il subsiste de nombreuses incertitudes.

« Le réchauffement du climat ne semble donc pas avoir de conséquences considérables sur le nombre de tempêtes touchant la France. Les tempêtes se trouvent dans une petite sous-population des dépressions à la fois intenses et rapides... ; Dès lors qu'un régime (de dépression) atteint des durées anormales de persistance, des anomalies de la ressource hydrique apparaissent : des crues dans les zones visitées, une prédisposition à la sécheresse dans les zones désertées.

Les résultats obtenus indiquent :

- une augmentation faible, à modérer, du risque de tempêtes dans la moitié nord de la France ;
- aucune variation décelable de ce risque dans la moitié sud ;
- une bonne réalimentation en eau de la partie nord, voire un excès conduisant à des crues, dépend de la combinaison des régimes zonal et zonal sud ; la partie sud est davantage liée à ce dernier régime ; or, dans toutes les classifications effectuées, ce régime tend à disparaître dans ce scénario ; le risque de préconditionnement à la sécheresse de la partie sud du pays se trouve donc, en revanche, très nettement accru. *Météo-France GAME et CERFACS 2005*».

5 - CONSEQUENCES DIRECTES DE L'ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES FONDAMENTAUX SUR LES USAGES

5.1 - Les inondations marines et la gestion des marais

Le niveau de protection des terres riveraines de l'estuaire est très dépendant de la présence et de l'entretien des digues ou levées. En particulier, sans ces digues, les zones de marais seraient régulièrement submergées par forts coefficients de marée dont la cote atteint et dépasse le niveau des terres de marais. Ceci entraînerait des conséquences lourdes et pénalisantes sur l'usage de ces terres mais aussi positive sur le plan de l'écosystème estuarien. [Le suivi de l'évolution des marais de Mortagne](#), partiellement dépoldérisée depuis la tempête de 1999 est riche d'enseignement sur l'évolution de ces milieux dans la zone haline de l'estuaire et montre toute l'importance d'une meilleure connectivité entre marais et estuaire pour de très nombreuses espèces.

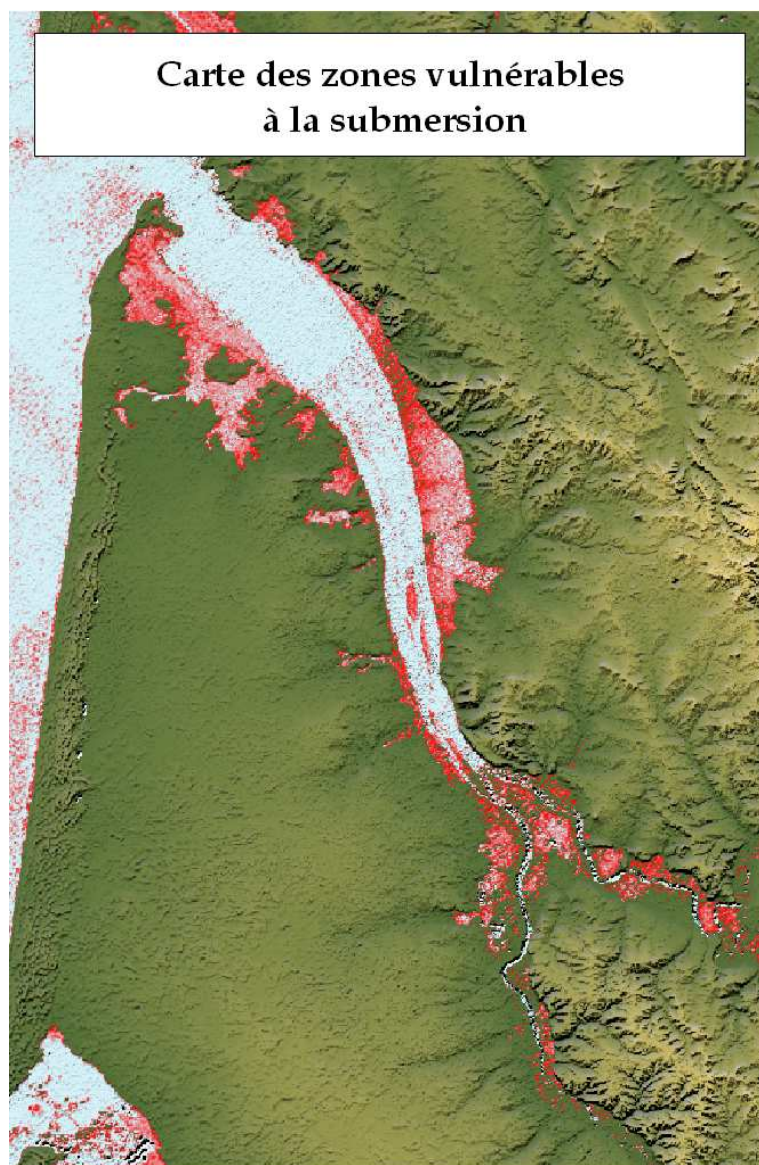
Les travaux en cours dans le cadre de [l'étude du référentiel de protection contre les inondations](#), permettront de requalifier précisément ce niveau de risque. Dans ce contexte, l'élévation du niveau océanique et estuarien semble jouer un rôle modeste par rapport à d'autres phénomènes tels que les surcotes liées au vent, à la dépression atmosphérique et aux vagues. Ce qui est certain c'est que la fréquence d'atteinte de certains niveaux augmentera logiquement, et que pour un même coefficient de marée, l'altitude du plan d'eau en 2030 sera plus élevée.

La submersibilité des digues par l'événement centennal du PPRI (insubmersible, < 10 cm, de 10 à 50 cm, > 50 cm) a été étudiée au travers de l'étude Référentiel qui fait apparaître sur les 311 km de digues de l'estuaire recensés :

- Non submersible : 130,7 km (42%)
- Faiblement submersible (0 - 0,1 m) : 34,1 km (10,9%)
- Submersible (0,1 - 0,5 m) : 101,6 km (32,6 %)
- Fortement submersible (+ 0,5 m) : 41,5 km (13,3%).

Malgré la modestie des augmentations relatives du niveau de la mer, le risque de submersion semble significativement augmenter puisque des digues passeront d'une classe à l'autre pour une dizaine de centimètres de plus. Il serait cependant nécessaire de qualifier le risque induit vis-à-vis des phénomènes de sédimentation (qui devrait globalement s'accroître) mais aussi vis-à-vis des érosions localisées des berges et sans doute une plus grande sollicitation des ouvrages de défense (digues et levées) et de la variabilité longitudinale de l'impact des évolutions du niveau océanique.

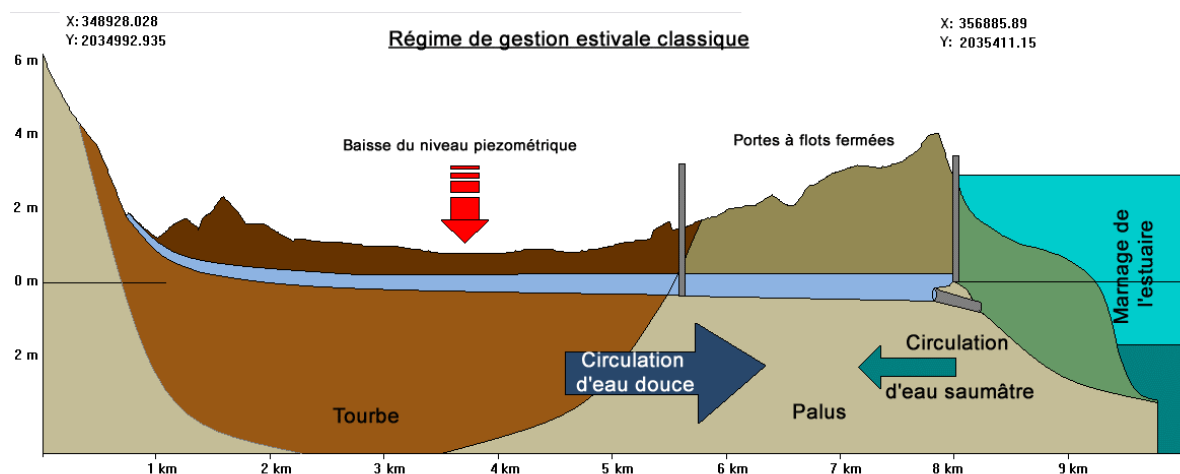
Les zones de marais et de palus resteront évidemment les plus vulnérables aux évolutions du niveau de la mer.



La vulnérabilité des zones de marais à une élévation du niveau de la mer dépend et dépendra encore essentiellement de la **capacité d'entretien des ouvrages de défense**. Le [volet économique du SAGE](#) apportera des informations importantes sur les enjeux financiers de cet entretien.

La gestion des marais est aussi très directement liée à **la gestion des niveaux d'eau**. Ceux-ci sont réglés par un cycle de vidange qui exploite le différentiel d'altitude entre le niveau moyen du marais et le niveau des basses mers. Si celui-ci augmente, les périodes favorables à la vidange seront réduites d'autant. L'anticipation de ce phénomène est d'autant plus importante, que le Sage a pour objectif de restaurer les échanges migratoires au travers des portes à flot. Les stratégies envisageables passent par un calage d'échancrure qui garantirait le non débordement du marais. **Une marge de sécurité doit donc être d'ores et déjà prévue. Un facteur aggravant** pourrait être le tassement des sols tourbeux en zone de marais. La question climatique pourrait à nouveau s'inviter au travers des phénomènes pédologiques et

de la perte en carbone des sols. La gestion des niveaux d'eau dans le marais est notamment liée à sa capacité de vidange. Ce paramètre est particulièrement important pour les marais valorisés en grandes cultures, pour lesquels il est nécessaire de vidanger le marais au printemps afin d'implanter les cultures.



La vidange du marais se fait au niveau des portes à flot, dont le temps d'ouverture dépend de la cote de la porte, du coefficient de marée et du niveau de la mer, ainsi que du niveau de l'eau dans le marais. Le cycle de vidange exploite donc le différentiel d'altitude entre le niveau moyen du marais et le niveau des basses mers. Si ce dernier augmente, les périodes favorables à la vidange seront réduites d'autant.

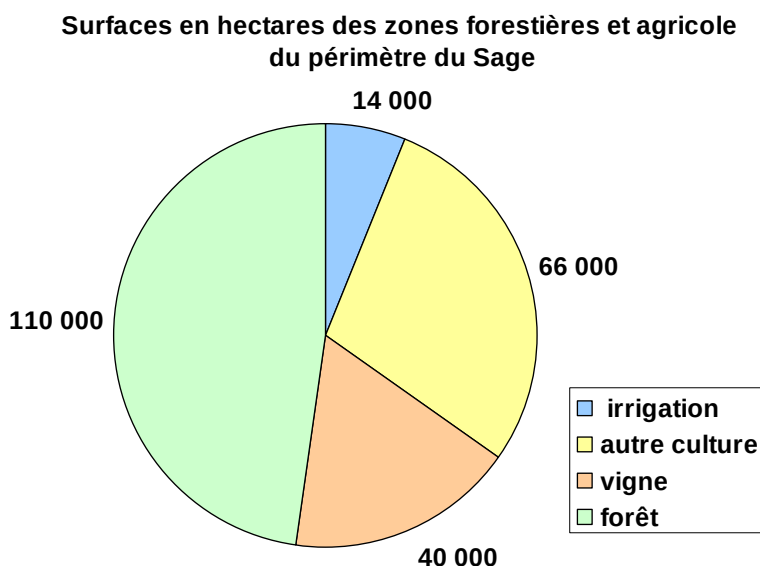
L'analyse des temps d'ouverture de la porte à flot a été réalisée sur le marais de Reysson selon 3 scénarios : à la date de construction de l'ouvrage (1870, soit environ -30 cm du niveau de la mer), en 2008 (référence marégraphe de Pauillac), en 2040 (hypothèse +10 cm). Notons que cette analyse ne peut être globalisée dans la mesure où chaque porte à flot est calée à un seuil spécifique. Les résultats font apparaître une réduction d'environ 40 minutes du temps d'ouverture des portes à flots sur un cycle de marée (perte d'environ 13%), par rapport à la situation lors de la construction de l'ouvrage (1870). Une élévation de 10 cm du niveau de la mer entraînerait une perte de 14 minutes supplémentaires.

	Passé	Actuel	Futur
Niveau marin (m):	-0.3	0	0.1
Ouverture portes moyen/cycle :	05:27	04:49	04:35
Différentiel:	00:38	00:00	-00:14

La dégradation des bilans des apports continentaux d'eau douce et de la consommation interne au marais pourrait conduire les gestionnaires à maintenir les niveaux par une introduction d'eau estuarienne.

5.2 - Les productions végétales locales

Sur le périmètre du Sage, près de la moitié de la surface est en forêt, 17% en vigne et le reste en prairies et cultures. Cette distribution qui construit les paysages estuariens est très dépendante des facteurs hydriques et thermiques.

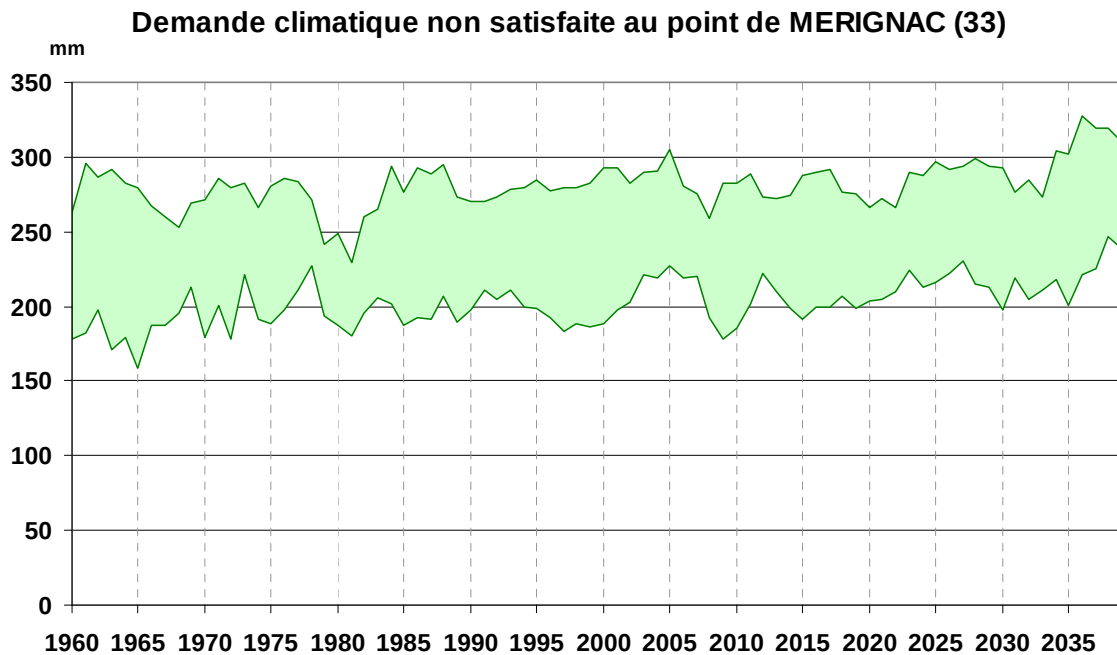
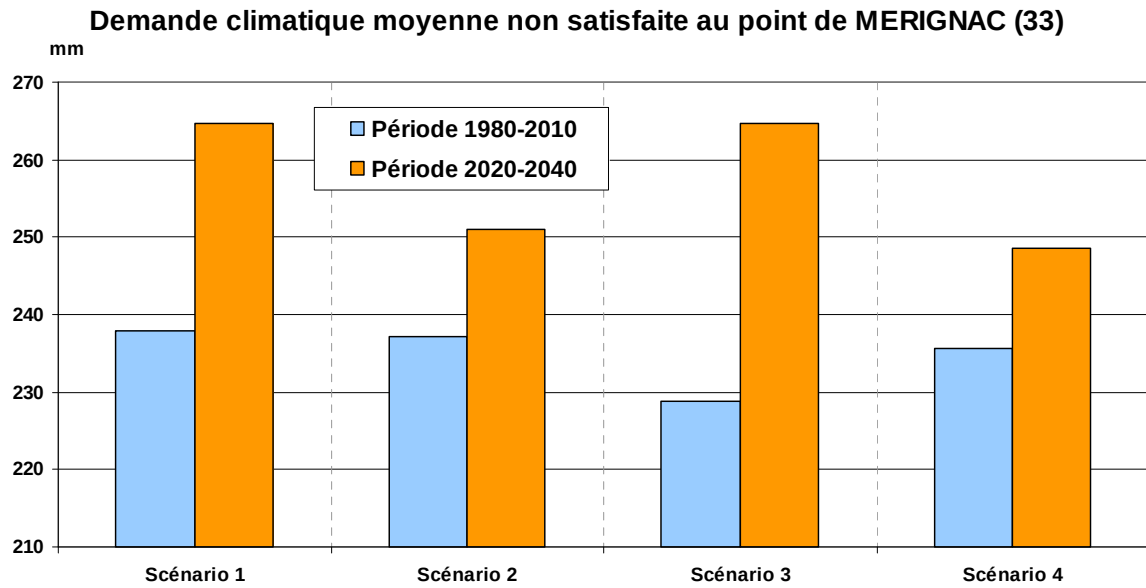


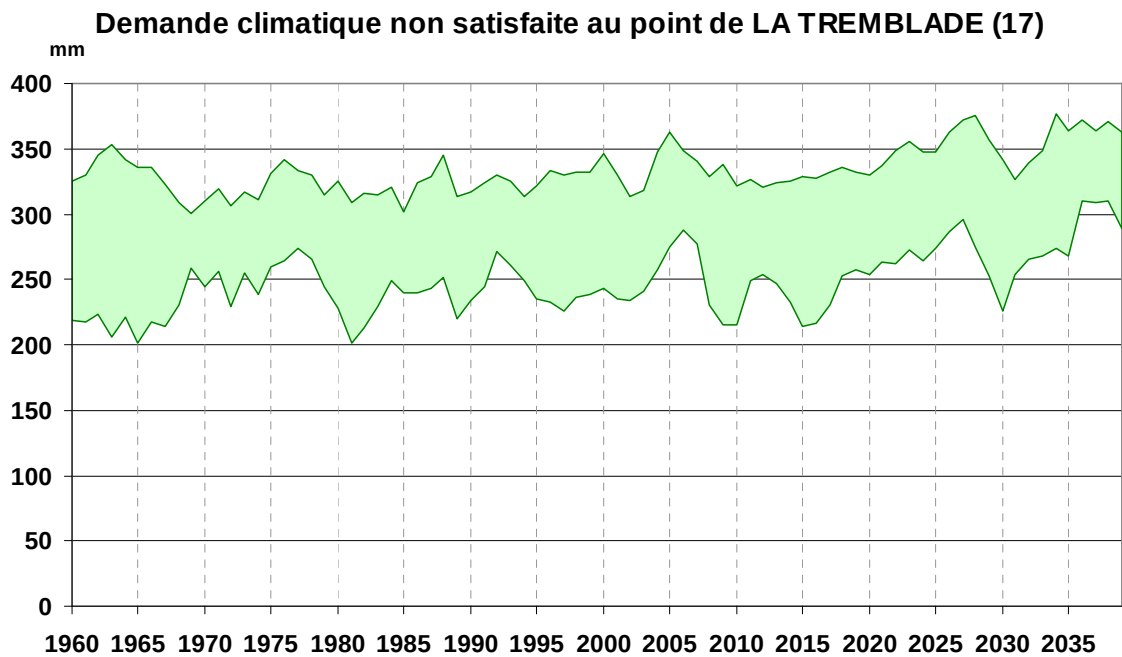
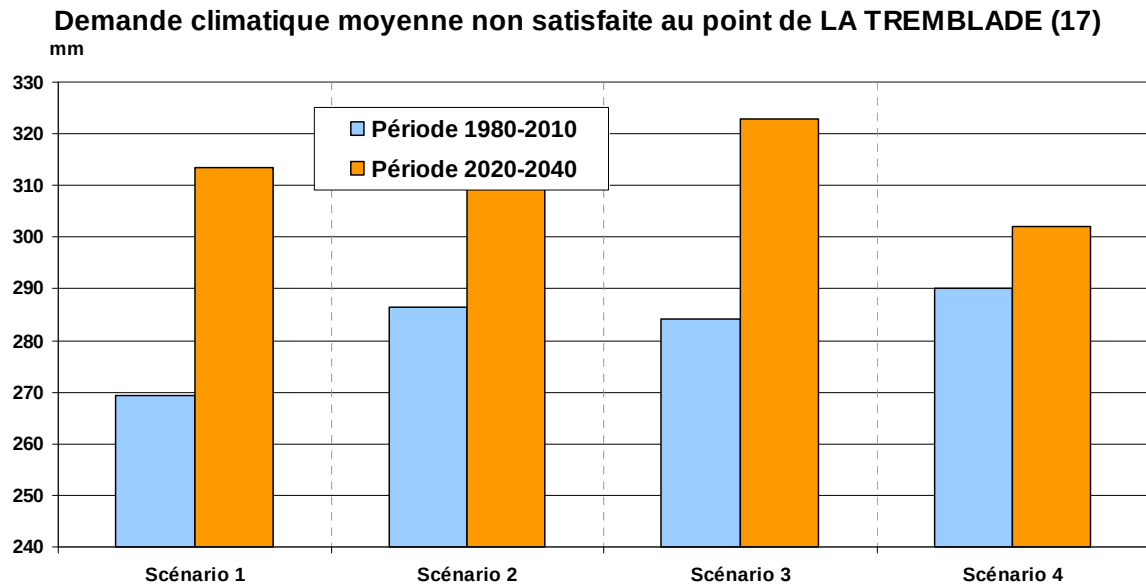
5.2.1 - Les grandes cultures : le déficit hydrique

L'évolution conjointe de l'ETP et la baisse des précipitations estivales se traduira par une augmentation de la demande climatique des cultures non satisfaite par les pluies. Cette évolution dépend surtout de deux paramètres :

- Le type de culture pratiquée : les cultures d'été seront les plus sensibles ;
- Le type de sol : les sols sableux, très représentés sur le territoire, seront particulièrement sensibles à la diminution de la fréquence des pluies estivales. Les sols à fortes réserves en eau seront plus sensibles à l'augmentation de l'ETP.

Un écart de l'ordre de +30 mm correspond à environ une semaine de demande en eau des plantes. Cette baisse de la satisfaction des besoins en eau pourrait se traduire par une perte de rendement ou par un appel accru à l'irrigation, dans la mesure où la ressource en eau est disponible. Les graphes ci après traduisent ce déficit hydrique (demande climatique non satisfaite) simulé pour une culture de maïs sur sol sableux dans l'intérieur des terres et en zone côtière.





5.2.2 - Stratégie agricole envisageable

L'évolution des contraintes peut se traduire par une plus grande maîtrise du cycle de l'eau agricole en passant soit par un renforcement des cultures de printemps qui, hors zone des sables, pourraient bénéficier d'une couverture des besoins hydriques moins menacés par l'évolution du régime des pluies. En zone des sables, le recours à l'irrigation paraît difficilement substituable. La principale contrainte sur le territoire sera alors la disponibilité de la ressource :

- En eau souterraine, c'est la nappe du plioquaternaire qui est la plus sollicitée en volume. Bénéficiant d'un fort taux de renouvellement, les stratégies de gestion seront non seulement liées à la maîtrise des prélèvements (volume prélevable) mais plus certainement à des efforts partagés avec les autres facteurs de gestion (cf. forêt et recharge des nappes profondes). [L'étude de cette nappe en cours par le BRGM](#), devra s'intéresser au bilan recharge / prélèvement dans un contexte moins favorable ;
- En eau superficielle, les simulations montrent une tension accrue soit du fait de la réduction des apports estivaux soit du fait d'une gestion plus contrainte dans les marais (salinité, niveau des eaux).

5.3 - La production forestière

5.3.1 - Situation actuelle

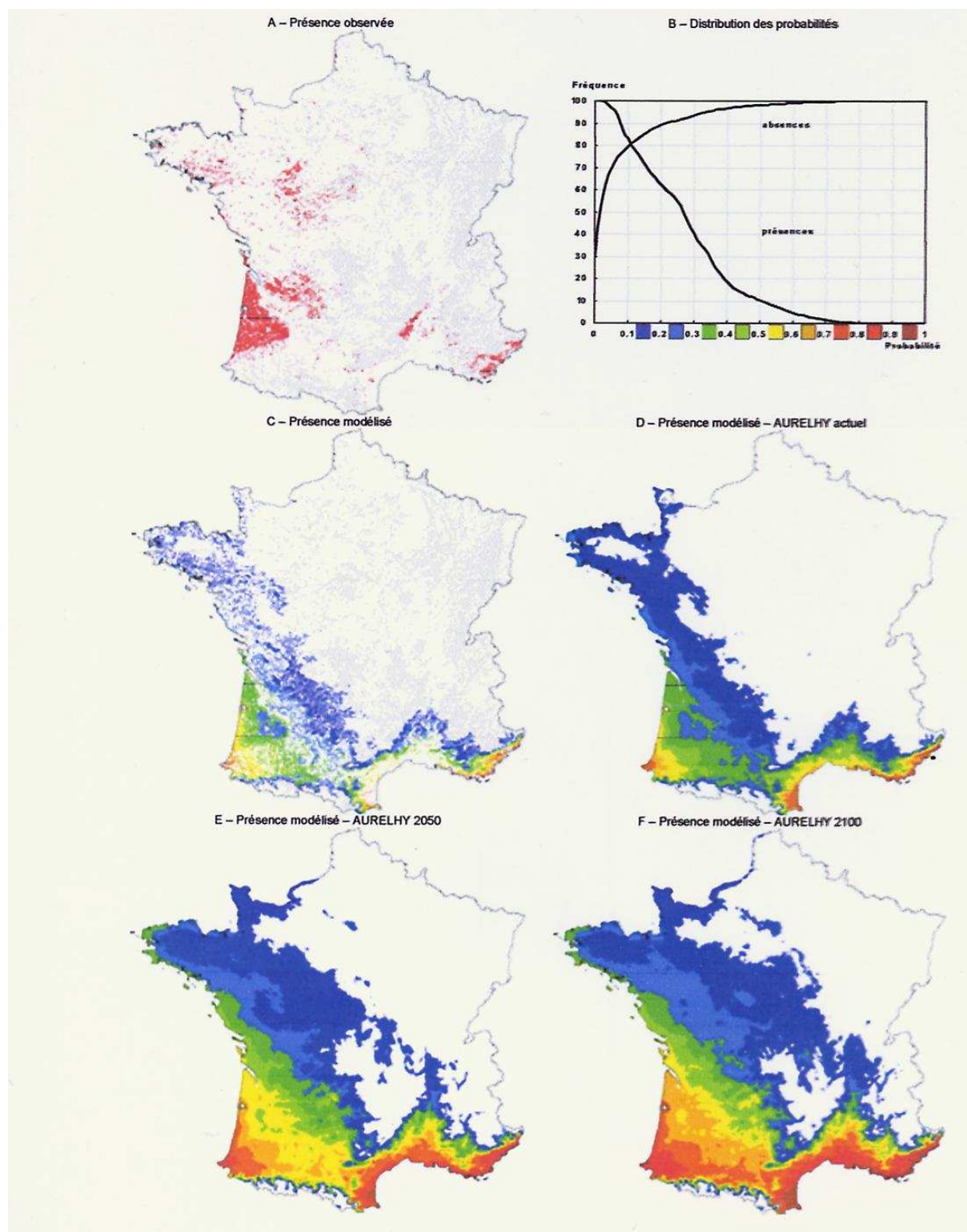
La forêt représente un peu moins de la moitié de la surface du périmètre, notamment dans le massif Landais. Le pin maritime est la principale essence forestière du massif. Le Médoc, territoire particulièrement humide en hiver, a été le dernier colonisé massivement par l'espèce. Le pin se situe ici plutôt en limite nord de son aire de répartition naturelle. Ceci lui conférerait donc une certaine résistance aux évolutions climatiques prévisibles qui se traduisent, pour la plupart des espèces, par un déplacement en latitude vers le nord de l'aire de répartition.

5.3.2 - Projection des conséquences climatiques

L'Inra a contribué au travers du [projet Carbofor](#) à projeter ce que serait la forêt de demain la mieux adaptée au futur environnement climatique. « Une analyse visuelle de l'aire de répartition de 67 espèces ligneuses, réalisée à partir des cartes individuelles de répartition des essences fournies par l'Inventaire Forestier National, a permis d'identifier 13 groupes chorologiques (groupe d'espèces présentant des aires de répartition semblables). La fonction discriminante des groupes chorologiques appliquée aux points de la grille AURELHY modifiée par les anomalies ARPEGE pour les périodes 2020-2049 et 2070-2099 permet d'établir une carte de répartition future des groupes chorologiques. » En résumé, l'hypothèse faite

qu'à condition climatique égale correspond un peuplement potentiel équivalent permet de vérifier le maintien ou la « migration » de groupe d'espèce en fonction des changements climatiques.

Pour le pin maritime qui appartient au groupe 7, les conditions futures seraient plutôt favorable au maintien des peuplements dans les Landes et au développement de l'aire d'extension dès 2050, situation s'amplifiant en 2100.



5.3.3 - Pratique forestière et spécificité du territoire

Le pin des Landes est considéré notamment en Médoc comme le principal allié de l'assainissement naturel des sols. En fait, la pratique est très liée à l'insuffisance ou à l'excès d'eau. L'engorgement d'eau en général hivernal est géré par un réseau de drain structuré autour des crastes collectant un réseau secondaire dont le fond est calé à -1,2m par rapport au sol. Ce réseau collecte le chevelu des drains de parcelle, moins profond (environ -0,8m) et qui est surtout entretenu à la plantation pour le démarrage des jeunes pins. Une fois la plantation installée, l'entretien de ces drains de parcelles est abandonné, le rabattement de la nappe de surface étant surtout conditionné par l'évapotranspiration (environ 40 mm en hiver).

En été c'est le manque d'eau qui devient limitant. Ce manque peut provenir soit d'une situation topographique spéciale (sur une dune par exemple) soit par la présence d'un alios superficiel (parfois moins de 50 cm) qui ferme l'exploitation du sous-sol par les racines. Cette contrainte a des effets évidents sur la production de bois : de 10 tonnes/an/hectare en bon sol, on tombe à 5 t/an/hectare sur dune ou lande sèche et à 0t/an/hectare sur une grande part du massif en année très sèche comme 2005, voire à des mortalités importantes sur certaines parcelles. **Le risque de dégât conséquent sur la production future en lien avec l'augmentation du déficit hydrique est donc bien réel.**

5.3.4 - Stratégies forestières face au risque climatique

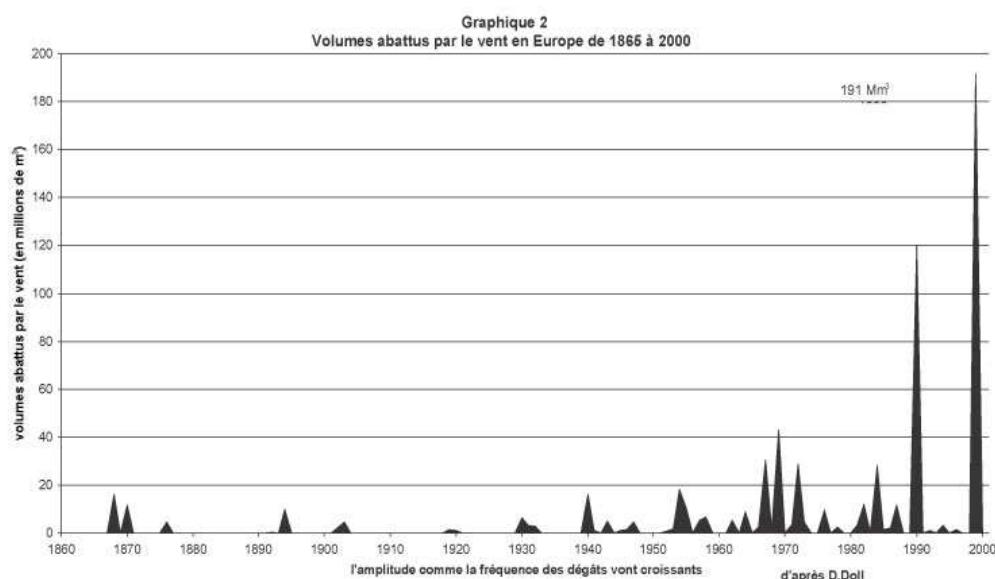
Les plantations de pin engagées aujourd'hui seront valorisées en 2060, celle de chêne en 2130. Le risque est donc à l'échelle des prévisions à très long terme. Il ne faut pas oublier que l'augmentation de la pollution atmosphérique (CO₂, azote) s'est traduit par des rendements très augmentés par rapport aux siècles précédents (x 2 en 200 ans).

Les stratégies possibles sont de plusieurs ordres :

- Mieux privilégier le potentiel d'adaptabilité des espèces forestières. Pour cela, il faut rechercher la diversité du patrimoine génétique des plantations, y compris au sein d'une même espèce. Le territoire des Landes dispose d'un avantage significatif du fait des nombreuses études sur le Pin réalisées depuis plusieurs décennies (Inra en particulier) mettant à disposition une importante collection d'individu issus d'un très vaste périmètre géographique (Maroc, Espagne, etc..). Les souches potentiellement adaptées à des climats plus chauds sont donc déjà présentes.

La difficulté provient de la réglementation actuelle qui freine ce brassage génétique pour des raisons de protection de la biodiversité d'aujourd'hui (notion de région de provenance). Le débat est important.

- Mieux maîtriser l'eau en recherchant notamment des compromis sur les concurrences potentielles avec l'agriculture irriguée dont le cycle cultural est partiellement déphasé avec celui du pin, mais aussi en travaillant collectivement et à la bonne échelle spatiale sur une maîtrise des niveaux de nappes par une action sur les drains. Les travaux en cours sur le [Plioquaternaire \(Brgm\)](#) vont dans le sens d'une meilleure compréhension des mécanismes de vidange de ces nappes. Une thèse est engagée sur la modélisation hydrologique d'un [petit bassin versant forestier \(Inra\)](#).
- Mieux qualifier les autres risques qui pèsent sur la forêt :
 - **L'incendie** : avec 2000 départs de feu par an la Gironde à un record de France qui ne se retrouve pas heureusement dans le nombre d'hectares brûlés (environ 2000 par an) grâce à une action volontariste consécutive aux grands incendies de 1949 (DFCI). Ce risque est pleinement assumé par les forestiers qui s'inquiètent cependant du développement humain (route, résidences, urbanisme) dans la forêt générant autant d'occasion de départ de feu.
 - **Les risque de tempête**, avec le traumatisme de 1999 (120 000 hectares détruits sur le massif forestier avec un paroxysme sur le Médoc). Pour les chercheurs, l'effet dévastateur des tempêtes sur les forêts peut d'ailleurs être un indicateur de l'évolution des tempêtes avec cependant un effet croisé avec l'état sanitaire de la forêt et le type de peuplement (les résineux seraient plus sensibles). Jusqu'à une vitesse de 100 km/h, le vent ne provoque que peu de dégâts aux forêts, abattant seulement quelques arbres malades ou au système racinaire déficient. De 100 à 150 km/h apparaissent des chutes ou bris d'arbres appelés chablis. Au delà de 150 km/h, bien peu de peuplements résistent. Si l'organisation post-tempête est une voie de travail très importante pour l'atténuation des conséquences, certaines pratiques sylvicoles peuvent favoriser une meilleure résistance à l'aléa. Les autres contraintes du territoire (type de sol, ressource en eau) limitent cependant la gamme des stratégies d'adaptations.



- o Les risques sanitaires (développement de parasites) sont largement suivis (base de données DAISIE).
- Valoriser les travaux scientifiques du passé sur l'adaptabilité des forêts et des groupes diversifiés potentiellement plus robuste face à un aléa mal décrit.

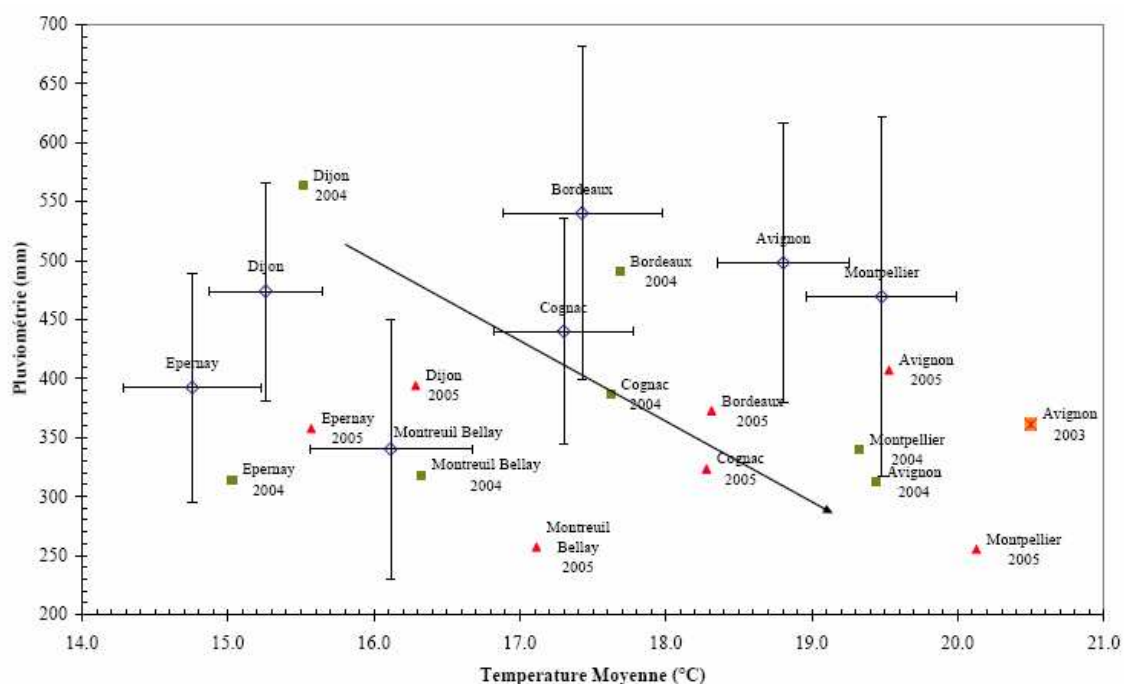
5.4 - La vigne : modification du calendrier viticole

Plus même que la forêt Landaise, la vigne constitue le fondement de très nombreux paysages estuarien. Activité économique de premier plan, elle porte une image de « marque » prestigieuse indissociable du territoire d'étude. Quelle interaction doit-on attendre entre le climat et la pratique viticole et entre ses pratiques et le fonctionnement plus global du terroir ?

La thèse récente d'Iñaki Garcia de Cortazar Atauri, « Adaptation du modèle Stics à la vigne (*Vitis vinifera* L.) : Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du Changement Climatique à l'échelle de la France », apporte énormément d'information sur les enjeux potentiels, y compris sur le vignoble Bordelais.

La modélisation (avec ses limites) apparaît à nouveau comme un outil précieux pour tester les conséquences du climat projeté. Le cycle annuel des températures, le rayonnement et la disponibilité de la ressource en eau, sont parmi les facteurs climatiques clef de cette analyse, avec en regard les caractéristiques du sol, la fertilisation et le système de conduite de la vigne. Les régions viticoles sont donc très largement caractérisées par leur climat.

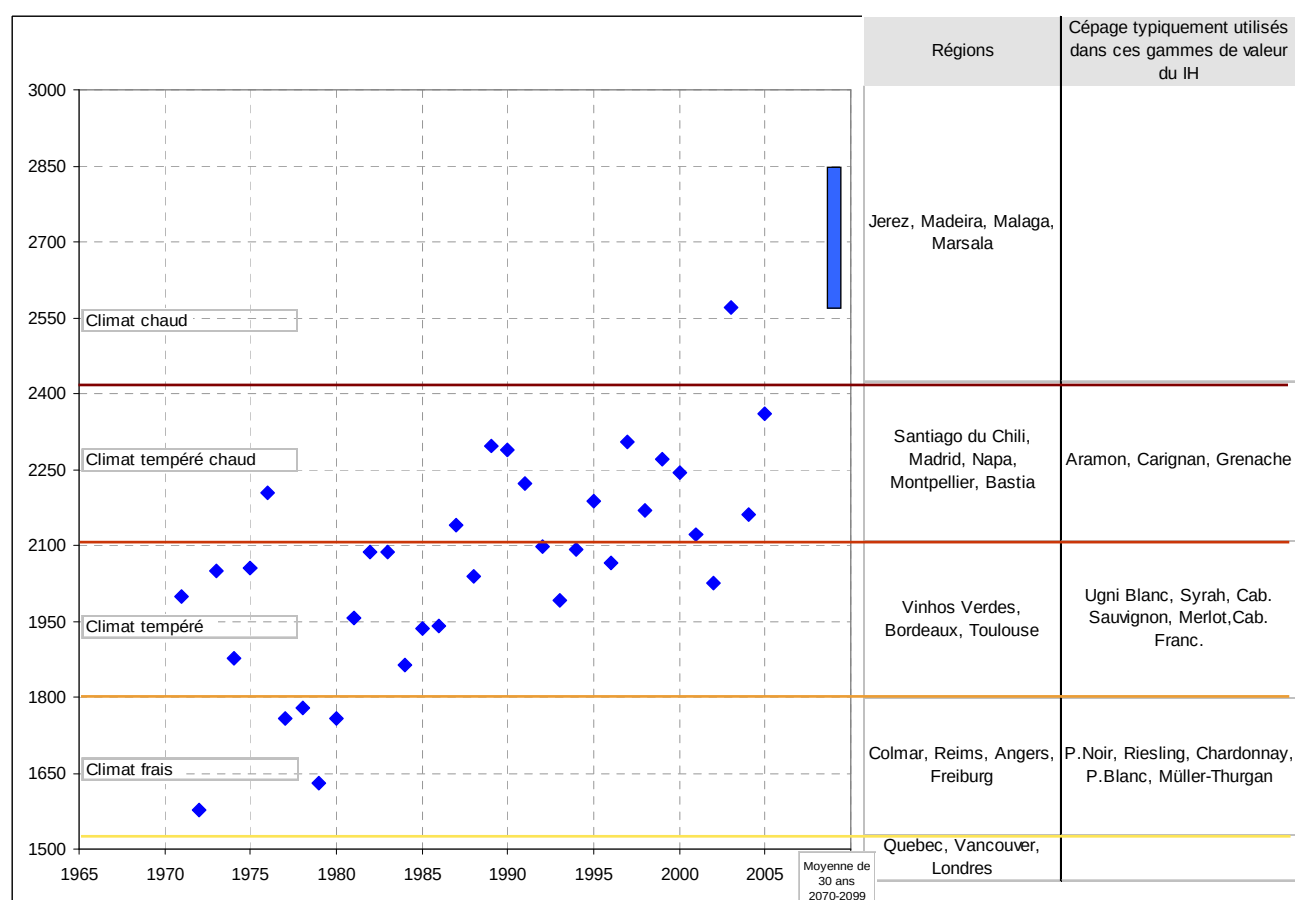
Distribution des différentes régions viticoles de l'étude en fonction de la température moyenne et du cumul de pluviométrie sur la période végétative de la vigne (1^{er} Avril – 31 octobre) : les losanges ouverts montrent les moyennes et écart-types historiques (1990-2002), et données de 2003 à Avignon, et de 2004 et 2005 pour tous les sites. La flèche représente la tendance climatique des années 2004 et 2005 vers des températures plus chaudes et des pluviométries plus basses sur les zones de l'étude. Illustration Iñaki Garcia de Cortazar Atauri



En particulier, le suivi tendanciel d'un indice basé sur le cumul des températures actives pour la vigne (avril-septembre) et tenant compte de la durée du jour permet une comparaison très parlante de quelques grandes régions viticoles de la planète et du glissement vers le nord des climats du sud. Au-delà de ce premier constat sur la viticulture, il faut rappeler que la qualité des vins produits est en lien direct avec le climat du cycle végétatif de l'année (notion d'optimum climatique).

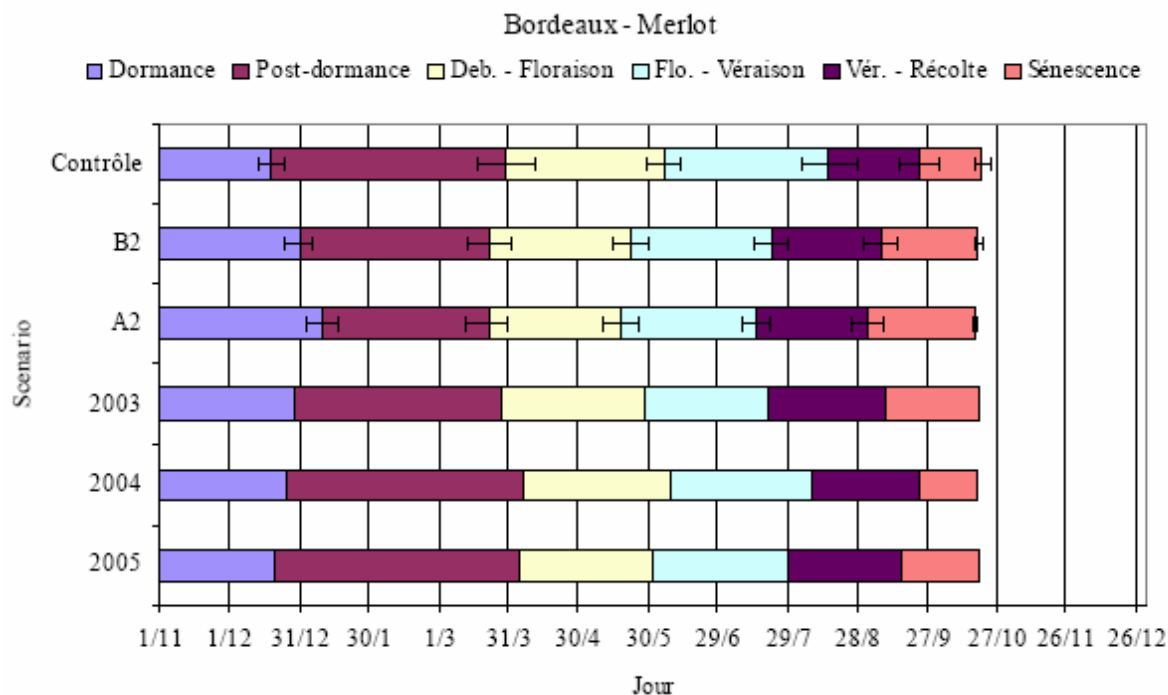
Evolution de l'indice héliothermique d'Huglin (IH) pour les vignobles de Bordeaux dans le passé et dans le futur (scénario A2) (points vides avec écart type). A côté du graphique, les différentes régions qui se trouvent actuellement dans chaque climat (toujours défini selon l'indice IH) et les cépages qui sont cultivés traditionnellement.

(Illustration adaptée d'Iñaki Garcia de Cortazar Atauri)



Les simulations climatiques réalisées par le chercheur s'appuient sur les données du modèle ARPEGE-Climat sur la période 2070-2099 (**scénarios A2 et B2 ?**) pour les scénarios futurs et sur la période 1970-2000 pour les données des séries réelles (pour la série Contrôle). Le calendrier viticole réagit à ces caractéristiques climatiques avec les ordres de grandeurs présentés dans le graphique ci-dessous.

Durée des phases du cépage Merlot suivant différents scénarios climatiques



Evolution de la durée des phases du cépage Merlot selon les scénarios climatiques par rapport à la situation actuelle

Bordeaux Merlot	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Sortie de dormance	22	12
Débourrement	-8	-8
Floraison	-18	-15
Véraison	-31	-24
Récolte	-22	-16
Sénescence	-3	-2

Si la plupart des stades et en particulier la vendange (plutôt centré sur août) devraient avancer dans la saison, notons que l'adoucissement des hivers devrait ralentir la sortie de dormance. Le calendrier végétatif (stade phénologique) se rapprochera de celui rencontré en 2003.

Au-delà de ces tendances, la thèse montre deux points essentiels pour la future gestion du territoire :

- La structure actuelle du vignoble de Bordeaux s'avère la mieux adaptée aux impacts du changement climatique (qualité et rendement).
- La situation hydrique au début du cycle sera meilleure qu'actuellement (en règle générale), ce qui va favoriser la croissance végétative. Le stress hydrique va augmenter dans toutes les régions à la fin du cycle de la plante.

Sur ce dernier point, les sols à faible réserve en eau (sol de graves) n'ont pas été suffisamment étudiés sous le climat futur Bordelais. **L'irrigation (envisagée dans d'autres régions viticoles)**, pourrait être une réponse sous réserve de la disponibilité de la ressource (forcément souterraine dans le secteur d'étude) déjà sollicitée par d'autres usages.

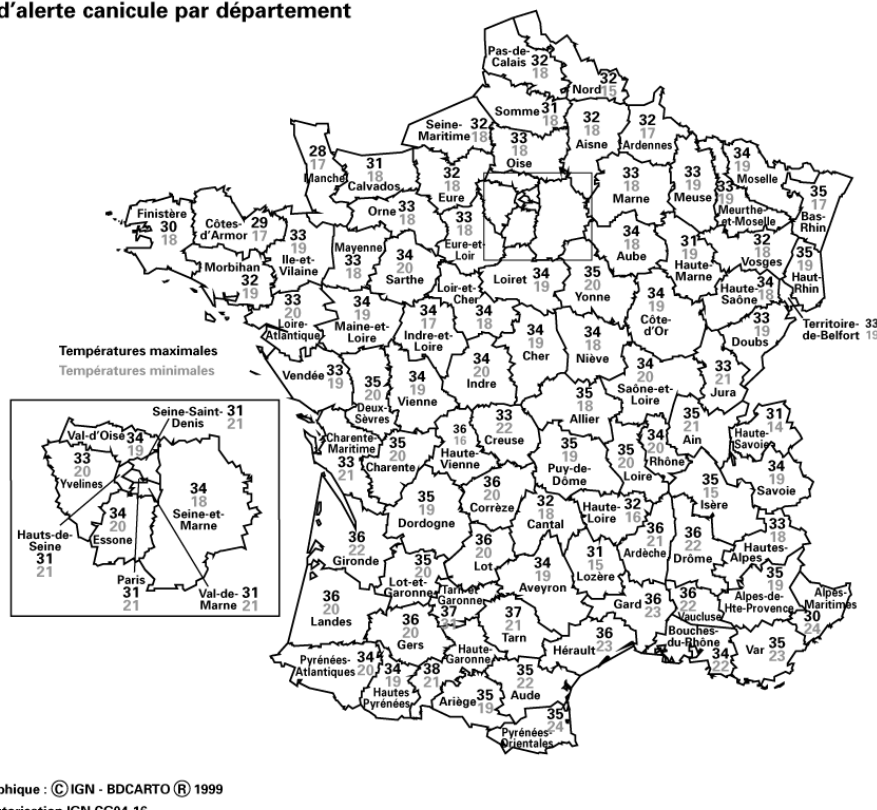
5.5 - Les canicules et le risque sanitaire

Le risque de canicule, est une conséquence directe des changements climatiques. Elle peut avoir des effets sanitaires importants dont les conséquences sur la gestion du territoire ne sont pas évidentes. (Tourisme ? plus forte demande sociale pour l'accès à l'eau ?). Le Smegreg en charge de la gestion des nappes profondes a montré que l'année 2003, année caniculaire de référence, s'est traduite par une augmentation de la demande en eau estimée à 3%, soit un tiers de l'effort de réduction programmé par les économies d'eau du Sage nappes profondes!

L'analyse du risque futur passe par une interprétation des températures diurnes et nocturnes que nous n'avons pas mobilisées à ce jour. Rappelons que le plan national canicule dont l'élaboration est pilotée par la direction générale de la santé comporte trois niveaux :

- La veille saisonnière, activée du 1^{er} juin au 31 août.
- Le niveau de mise en garde et actions (MIGA), induisant la mise en œuvre sur le terrain de mesures de gestion de l'épisode caniculaire. Il est déclenché sur recommandation du ministère de la santé par le préfet des départements concernés par une alerte émise conjointement par Météo France et l'Institut de Veille Sanitaire.
- Le niveau de mobilisation maximale. Il est déclenché sur instruction du Premier ministre lorsque la canicule est aggravée par des effets collatéraux (rupture de l'alimentation électrique, pénurie d'eau potable, saturation des établissements de santé, ...).

Les seuils d'alerte canicule par département



DISCUSSION

Il existe déjà en Europe et aux Etats-Unis des systèmes d'alerte destinés à réduire l'impact sanitaire des vagues de chaleur au niveau local [4]. L'originalité de notre système est son extension géographique à toute la France métropolitaine.

Le choix final d'un indicateur mixte fondé sur les températures minimales et maximales est cohérent avec la littérature : la température maximale ne permet pas toujours d'estimer les risques encourus, et c'est souvent l'absence de rémission nocturne qui empêche l'organisme de récupérer [5]. Le cumul sur trois jours permet en partie de prendre en compte, mais de manière indirecte, le phénomène de persistance de la chaleur. Les seuils de surmortalité retenus (50 ou 100 %) sont conformes à l'objectif du PNC qui était d'anticiper la survenue de conséquences sanitaires graves d'une vague de chaleur, et par ailleurs il était impossible de prendre des seuils plus bas du fait de la variabilité interjournalière importante de la mortalité.

Comme le montrent les VPP et les sensibilités (tableau 1), le nombre de fausses alertes est variable selon les villes, faible à Bordeaux et Paris et plus important à Dijon et Limoges. Mais ceci doit être relativisé puisque la surmortalité reste souvent élevée pendant les fausses alertes : ainsi à Strasbourg la médiane de la surmortalité est, selon le seuil, de 62,9 ou 90,5 % : les moyens mis en œuvre par le déclenchement de l'alerte n'auraient donc pas été complètement injustifiés. A Marseille, le nombre de fausses alertes en 2003 peut probablement s'expliquer en partie par les actions de prévention réalisées depuis quelques années et qui auraient permis d'éviter une forte surmortalité malgré la canicule.

Plusieurs études ont montré qu'il existait des contrastes spatiaux importants dans la surmortalité liée à une vague de chaleur, avec une différence entre les régions côtières et les régions continentales, les régions habituées ou non aux chaleurs estivales, les villes et les campagnes [6]. Cette hétérogénéité spatiale est retrouvée dans nos résultats, avec des seuils différents suivant le département.

Tableau 1

Les seuils d'alerte des villes pilotes du SACS 2004

	Tmin – Tmax °C	VPP*	Se*
Bordeaux	22-36	0,71	1
Dijon	19-34	0,44	0,15
Grenoble	15-35	0,24	0,36
Le Havre	Aucun seuil n'a pu être déterminé		
Lille	15-32	0,3	0,64
Limoges	16-36	0,44	0,16
Lyon	20-34	0,54	0,59
Marseille	22-34	0,32	0,6
Nantes	20-33	0,55	0,61
Nice	24-30	0,54	0,72
Paris	21-31	0,66	0,96
Strasbourg	17-35	0,54	0,6
Toulouse	21-38	0,11	1
Tours	17-34	0,56	0,52

* VPP = Valeur Prédictive Positive (probabilité d'avoir un dépassement du seuil de surmortalité lorsque le seuil biométéorologique est dépassé). Se = Sensibilité (probabilité d'avoir un dépassement du seuil biométéorologique lorsque le seuil de surmortalité est dépassé)

6 - LES FUTURS PARAMETRES DE L'HYDROSYSTEME

Ce chapitre présente les évolutions probables des différentes composantes de la ressource en eau, des habitats aquatiques et du fonctionnement estuarien. Les interactions entre les différentes composantes de l'hydrosystème, mais aussi avec les facteurs anthropiques locaux, deviennent très importantes. Ce niveau n'est plus complètement celui des impacts subis et de l'adaptation mais déjà celui de la maîtrise des actions de prévention.

6.1 - L'hydrologie superficielle des grands cours d'eau

6.1.1 - Les données mesurées

Les facteurs hydrologiques qui ont été retenus ici sont ceux facilement accessibles à partir des chroniques de débits mesurés sur les réseaux hydrométriques publics.

3 stations sont analysées :

- Tonneins (anciennement Mas d'Agenais) sur la Garonne : 1913/2007
- Gardonne sur la Dordogne : 1959/2007
- La Jalle de Ludon au Pian Médoc (indicateur local) : 1973/2007

Les indicateurs étudiés sont : le module, les crues, les étiages.

6.1.1.1 Le module

Le module donne une image de l'abondance de la lame d'eau ruisselée et non prélevée. C'est l'indicateur le plus simple de la ressource en eau. Ainsi, on remarque sur la Garonne que les années 40 ont présenté un profil hydrologique remarquablement sec.

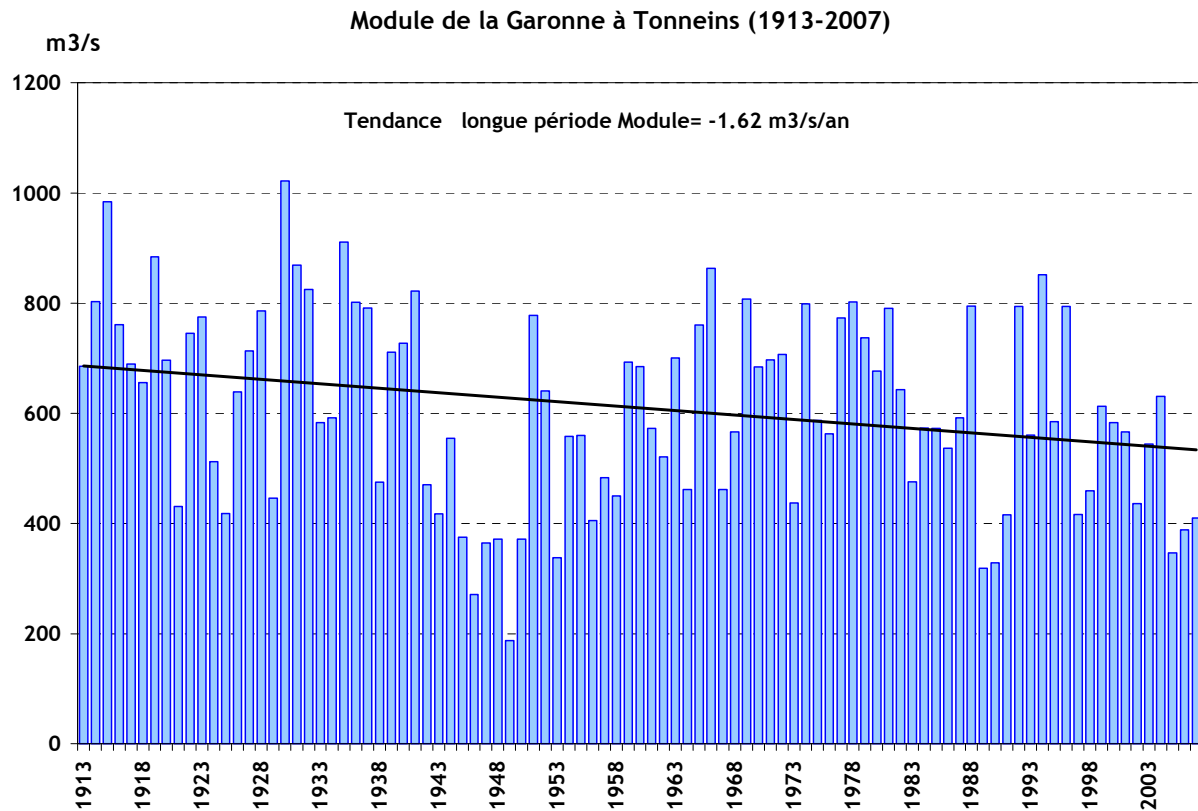
Les variations annuelles de ce paramètre sont importantes et les analyses tendancielle peuvent donner un poids trop fort aux dernières années plutôt sèches. Ainsi la décroissance tendancielle semble s'accélérer depuis 1960.

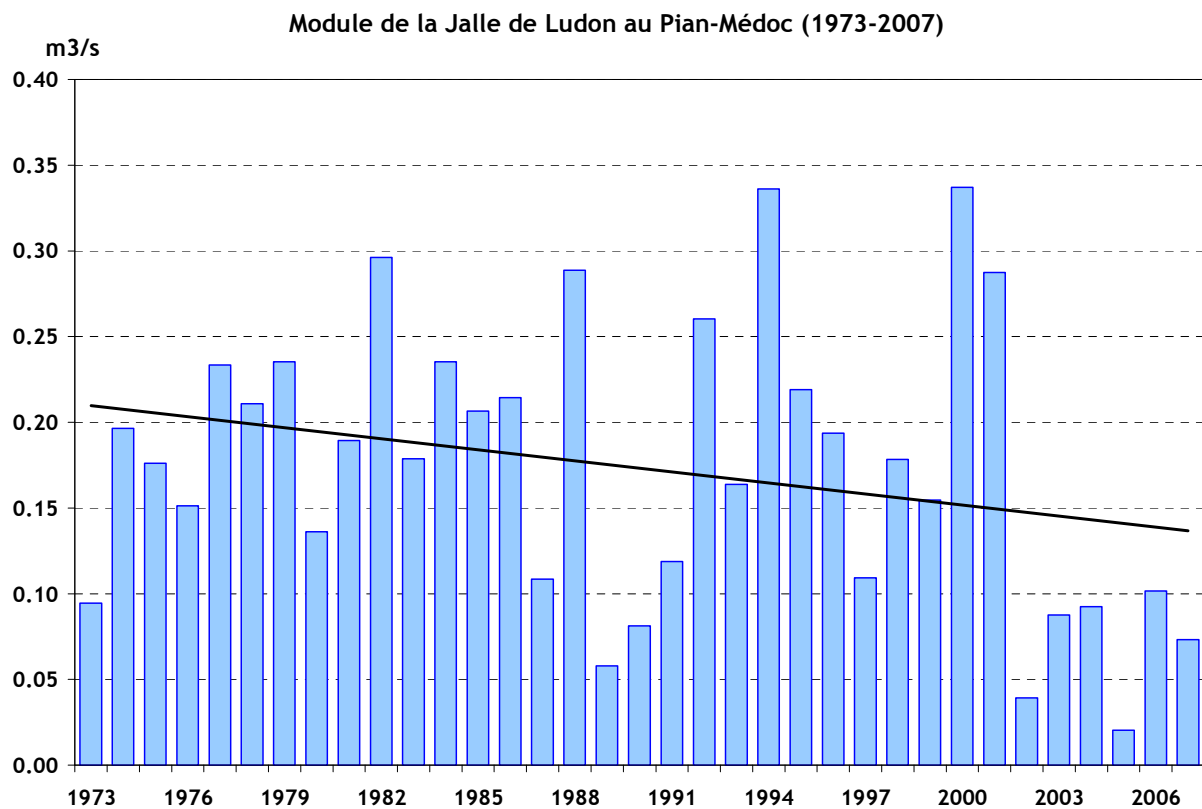
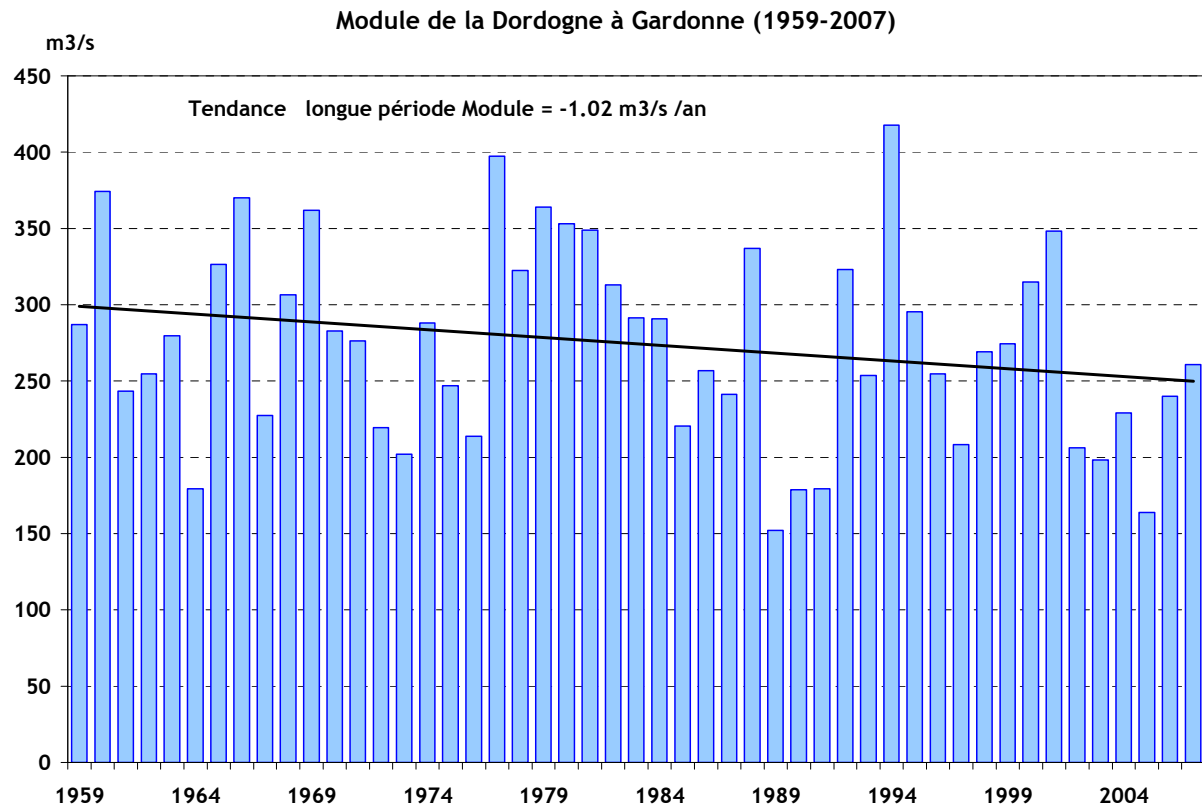
Pour un module interannuel de 610 m³/s sur la longue période on constate que cette valeur est atteinte ou dépassée 1 année sur 2, mais que si l'on s'intéresse aux 25 dernières années (1983/2007) la proportion passe à 1 année sur 4 seulement.

Entre les deux périodes de 25 ans consécutifs extrêmes de notre chronique 1913/1937 et 1983/2007 le module est passé de 721 m³/s à 543 m³/s. Rappelons que un écart de 170 m³/s sur 100 ans comme suggéré par les courbes tendancielle se traduit par 5,3 milliards de m³ d'eau douce en moins au droit de Bordeaux.

Sur la Dordogne et la Jalle de Ludon, les chroniques moins longues ne permettent pas de dégager autant d'information. Il est cependant remarquable que les tendances

enregistrées sur la Dordogne montre un parallélisme fort avec la Garonne puisque depuis 1959, la tendance est une perte de module estimée à 50 m³/s en 48 ans. Pour l'estuaire, la perte serait d'environ 2,6 m³/s/an.



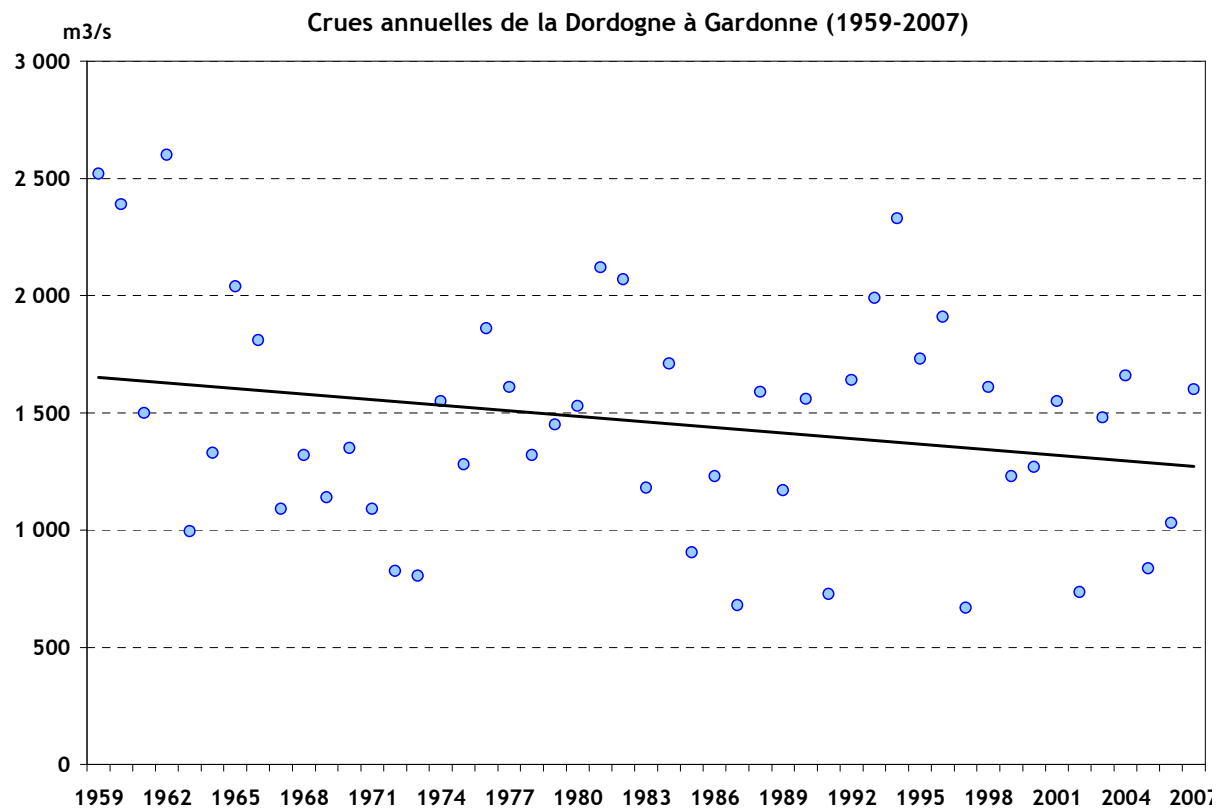
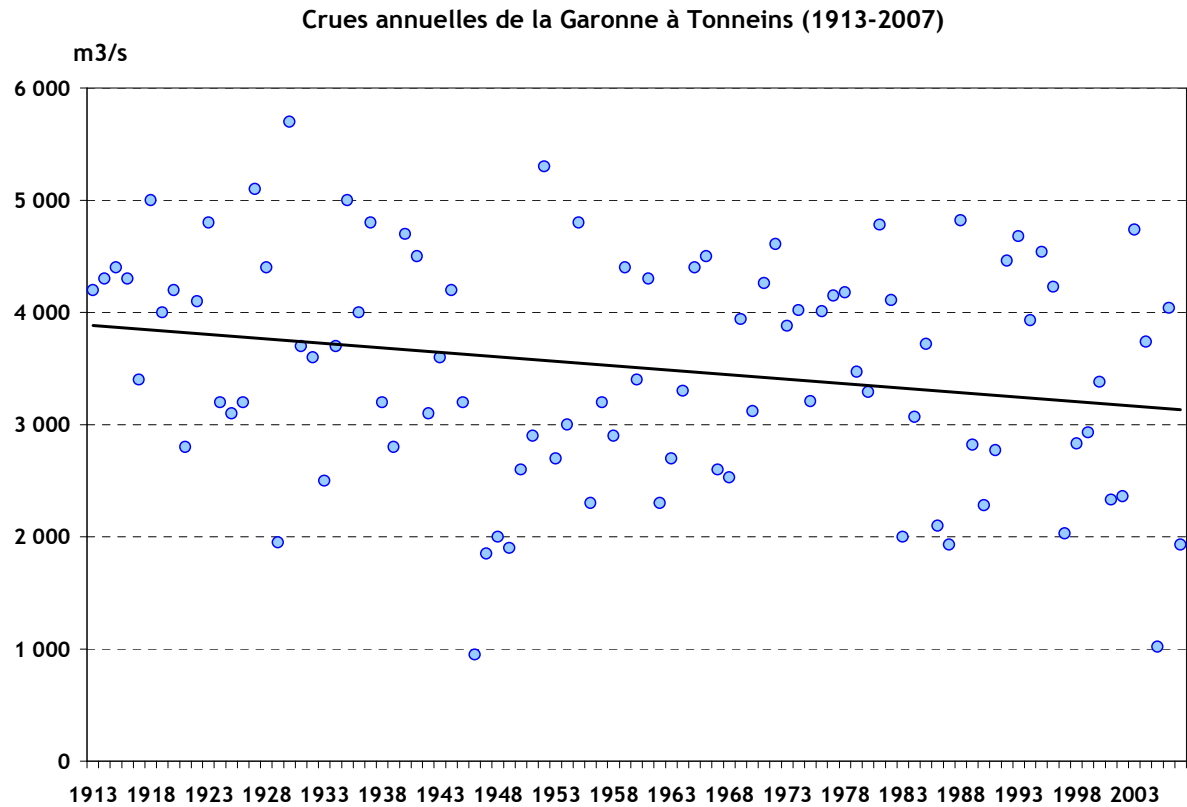


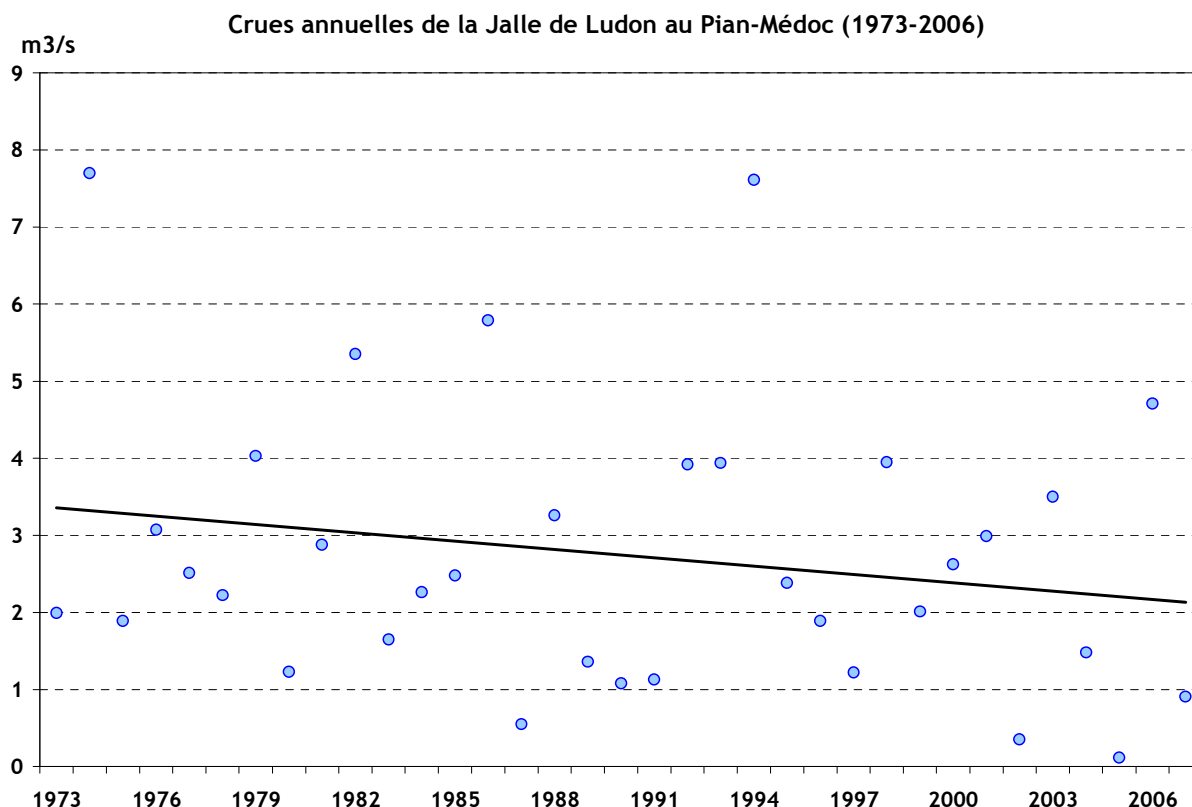
6.1.1.2 Les crues

A priori les crues se prêtent mal à l'analyse tendancielle car un événement majeur est très rare par définition. En revanche, le suivi des maxima annuels peut montrer des tendances lourdes.

Sur la Garonne comme sur la Dordogne, on note une réduction tendancielle de ce maximum annuel qui peut avoir des explications diverses :

- la mesure des débits les plus élevés n'est pas aisée et les méthodes de mesure en continu d'aujourd'hui ne sont pas celle du début du XX^{ème} siècle.
- L'aménagement du bassin s'est traduit par une incidence forte des grandes retenues hydroélectriques. Sur la Dordogne il y a un avant et après Bort les Orgues.
- L'occupation du sol a pu évoluer avec en particulier une croissance de la couverture forestière dont l'incidence globale est probablement plus forte que l'augmentation tout aussi réelle des surfaces imperméabilisées.





6.1.1.3 Les étiages

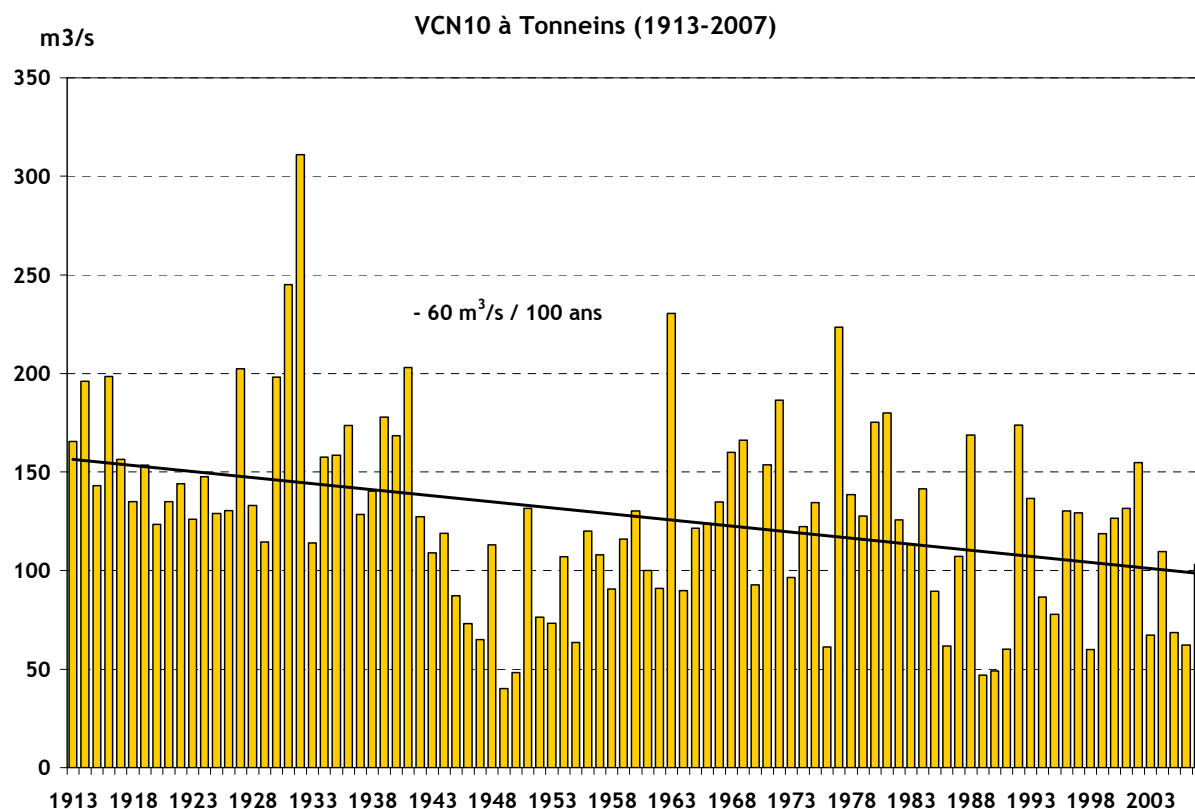
Le paramètre des étiages est sans doute le plus délicat à analyser car il est non seulement difficile à mesurer (la station de Bergerac a été peu fiable sur ce critère pendant de nombreuses années), mais il est le plus sensible à l'activité humaine.

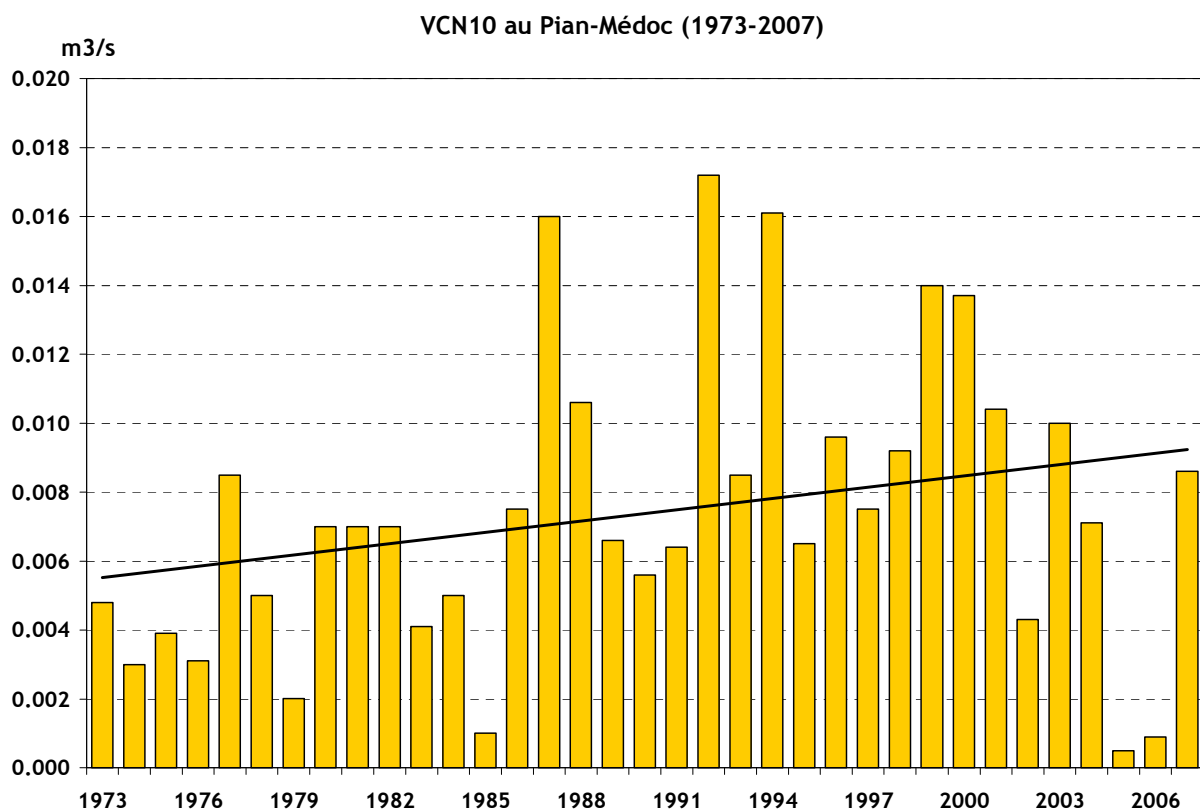
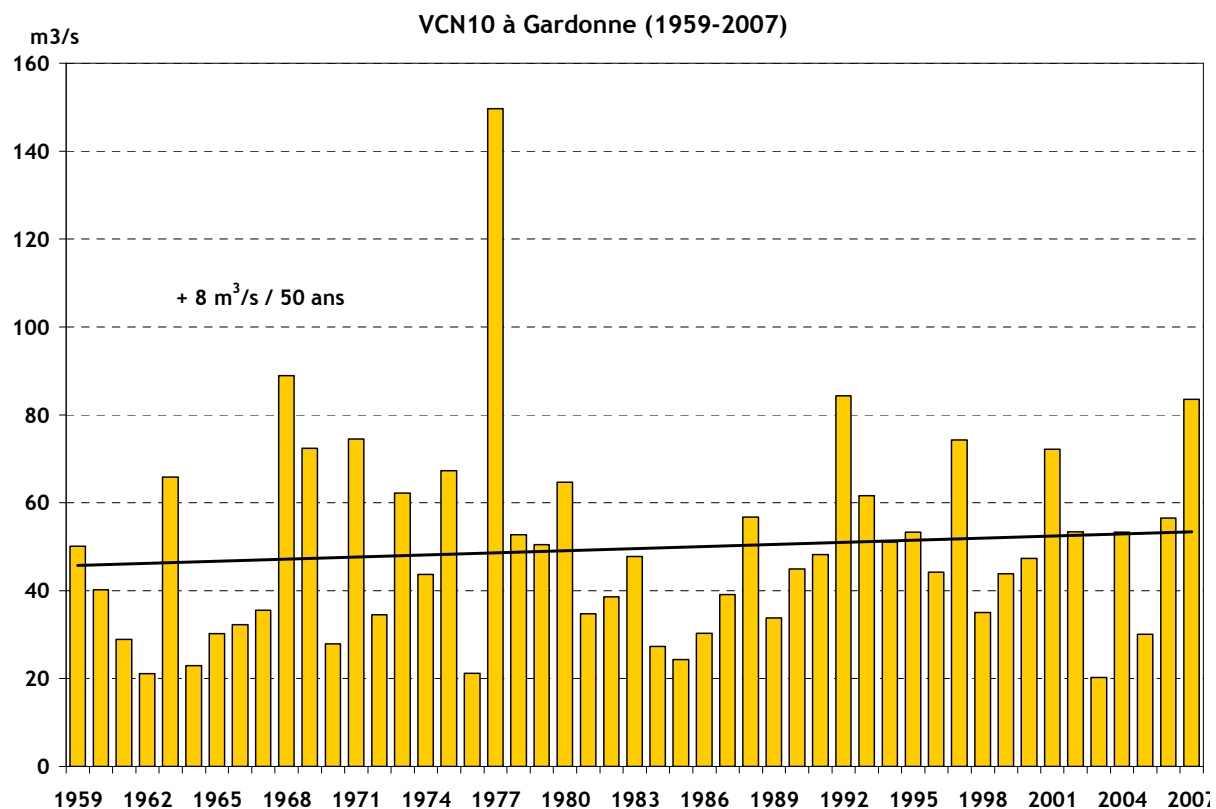
On distingue cependant deux comportements contrastés sur le bassin :

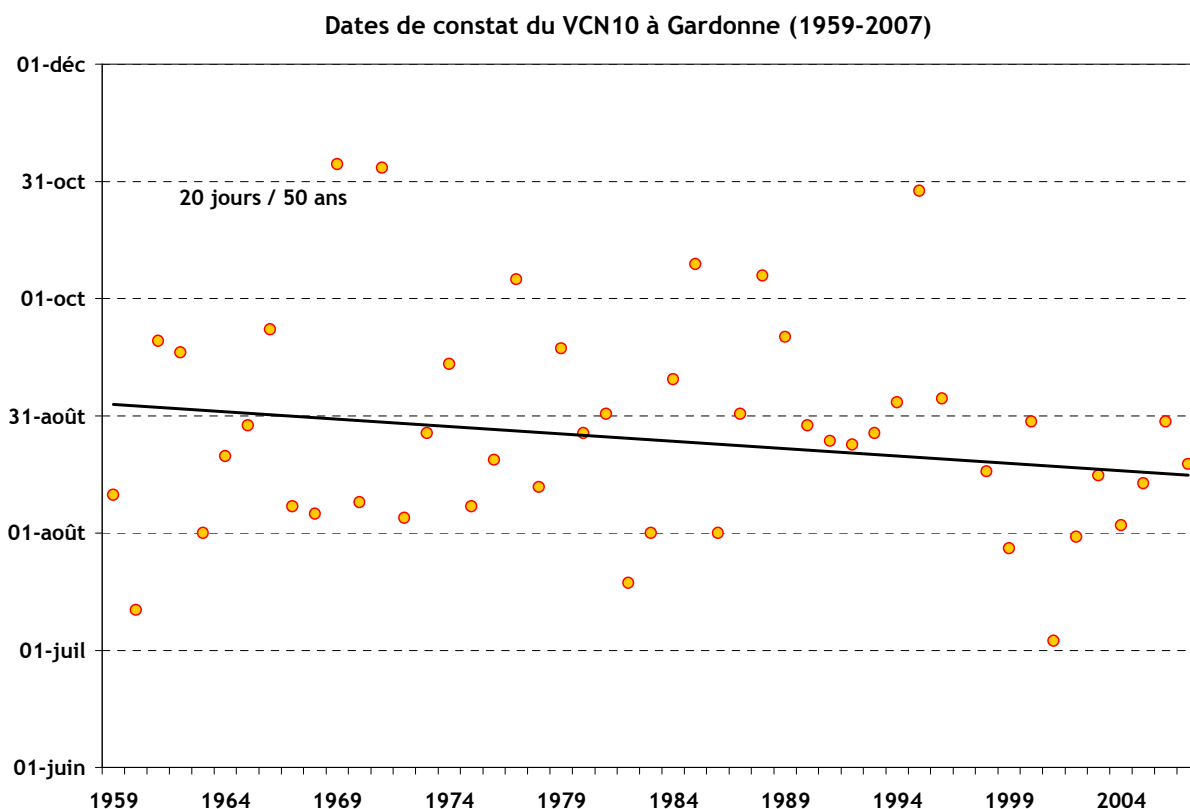
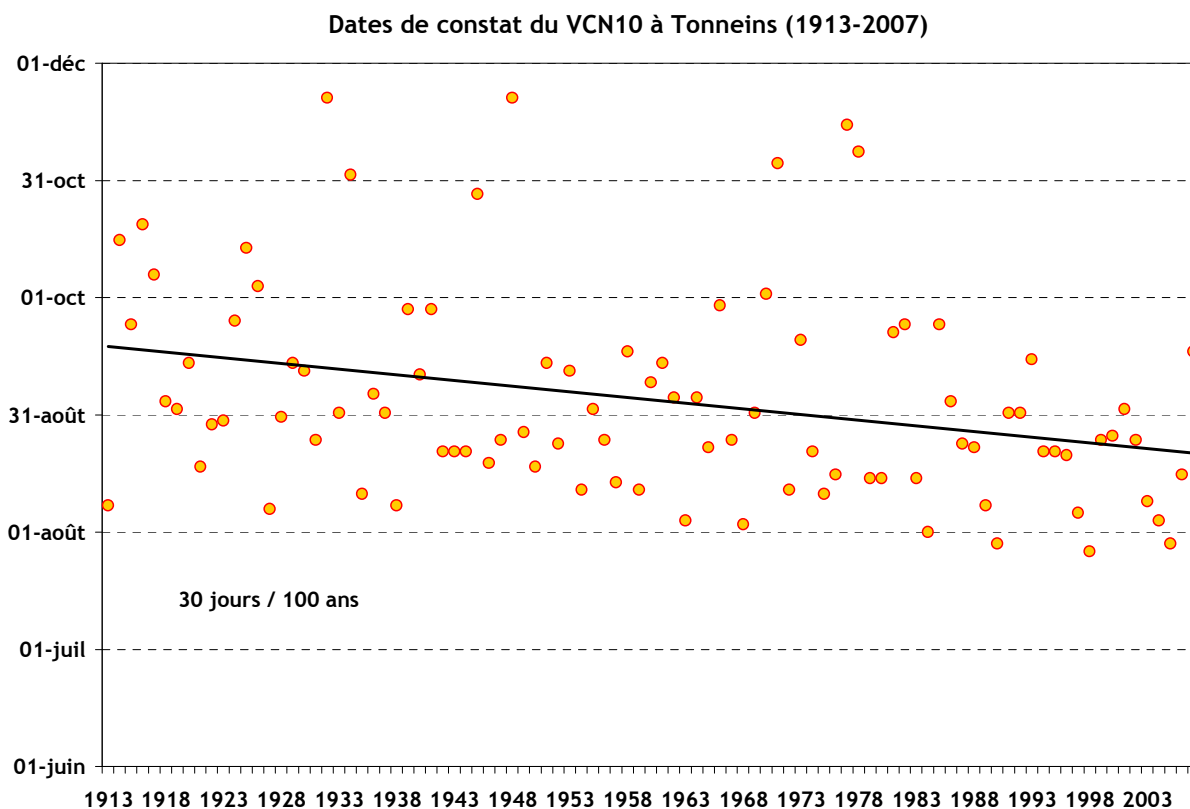
- La Garonne voit une situation tendancielle sans équivoques puisque l'on perd environ 600 l/s chaque année depuis 90 ans. Le débit d'étiage serait en tendance divisé par trois ! La traduction la plus concrète en est le nombre de jour où le DOE (100 m³/s) est franchis (jamais avant 1945)
- La Dordogne se caractérise par une relative stabilité. Cette situation est largement due à l'effet du débit garanti par les grands aménagements hydroélectriques.
- La station du Pian Médoc illustre le poids des modifications même mineures sur des régimes d'étiage extrêmement faibles. L'analyse tendancielle n'est pas significative sans une expertise de détail de l'aménagement du bassin (rejet de station d'épuration, transfert de captage de source, ...).

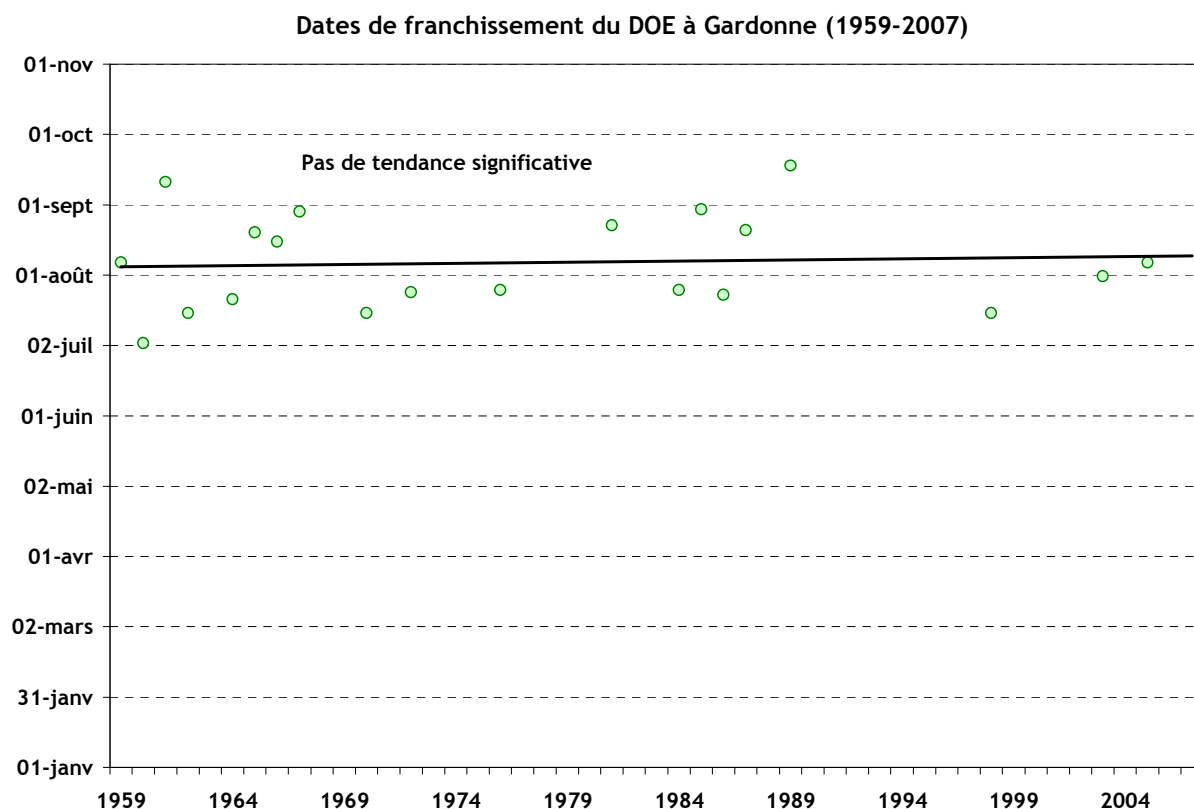
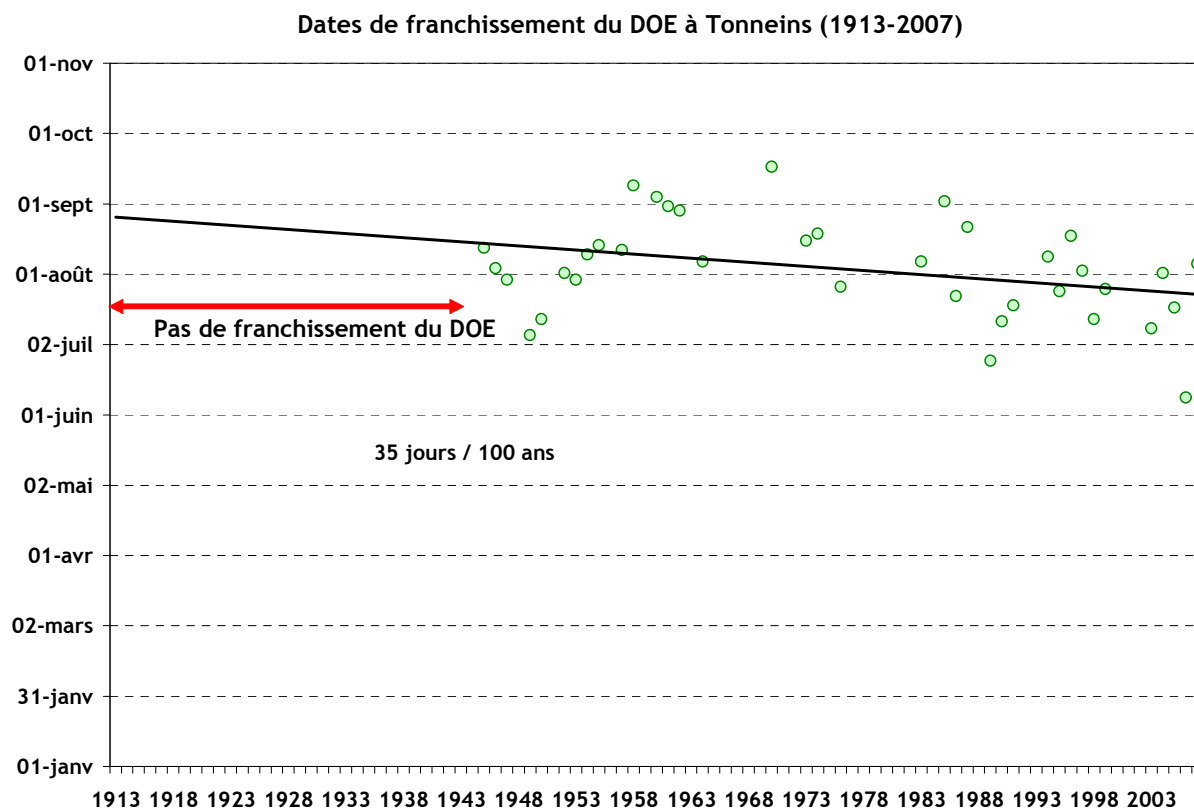
Les autres éléments forts sont la date d'entrée en étiage qui apparaît de plus en plus précoce surtout pour la Garonne, ce qui s'accorde bien avec des constats fait

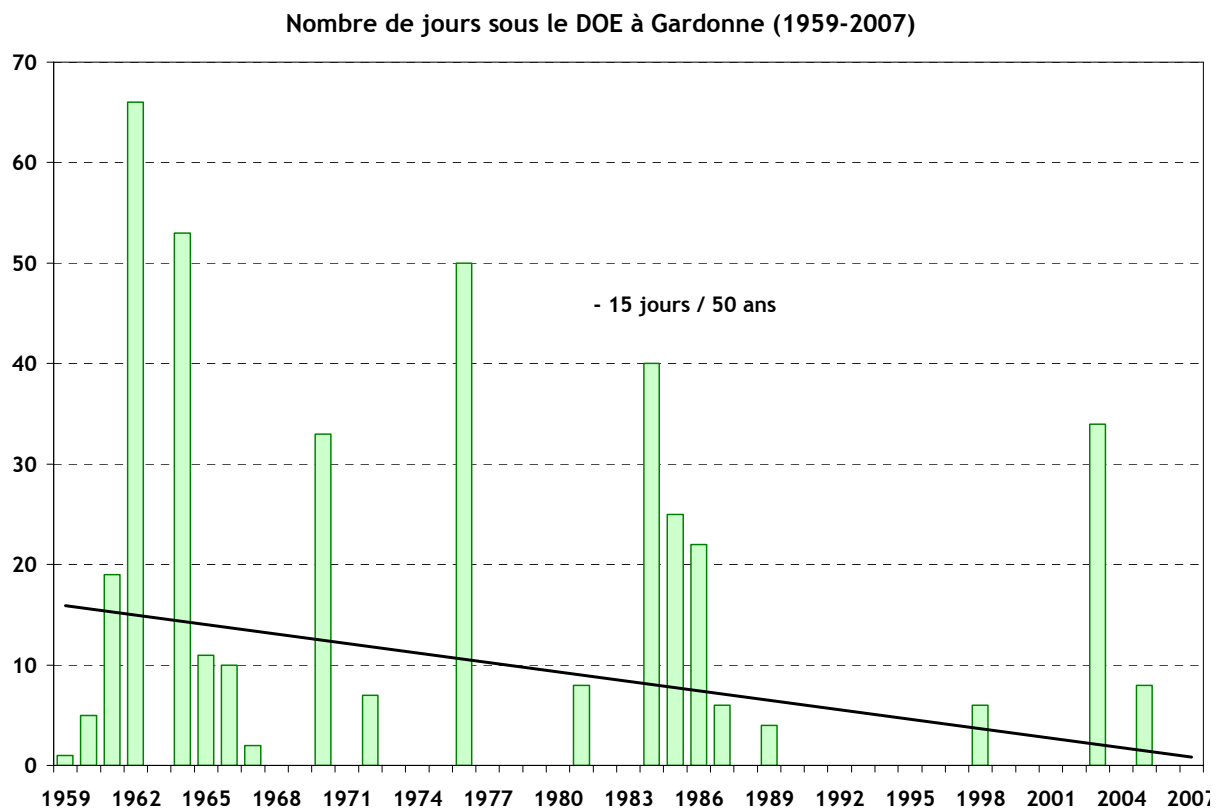
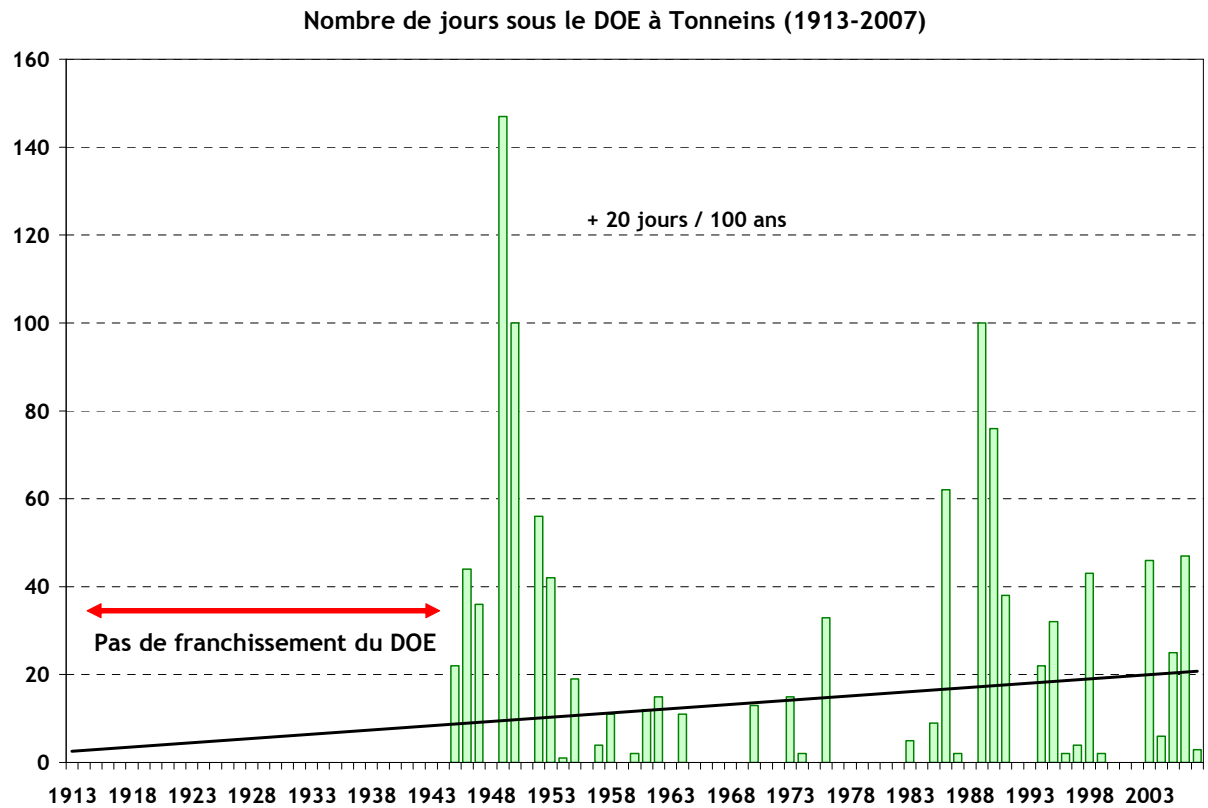
en montagne d'une fonte des neiges plus rapides mais aussi avec une pression sur la ressource qui décale l'entrée en étiage vers le début de la campagne de l'été. La date d'entrée en étiage gagne 1 jour tous les 3 ans soit un mois en un siècle. Les conséquences seront majeure sur le respect des objectifs d'étiage et de la sécurisation des cultures qui peut de moins en moins compter sur le « soutien d'étiage naturel » de la fonte des neiges.











6.1.2 - Une interaction forte avec l'aménagement du bassin versant

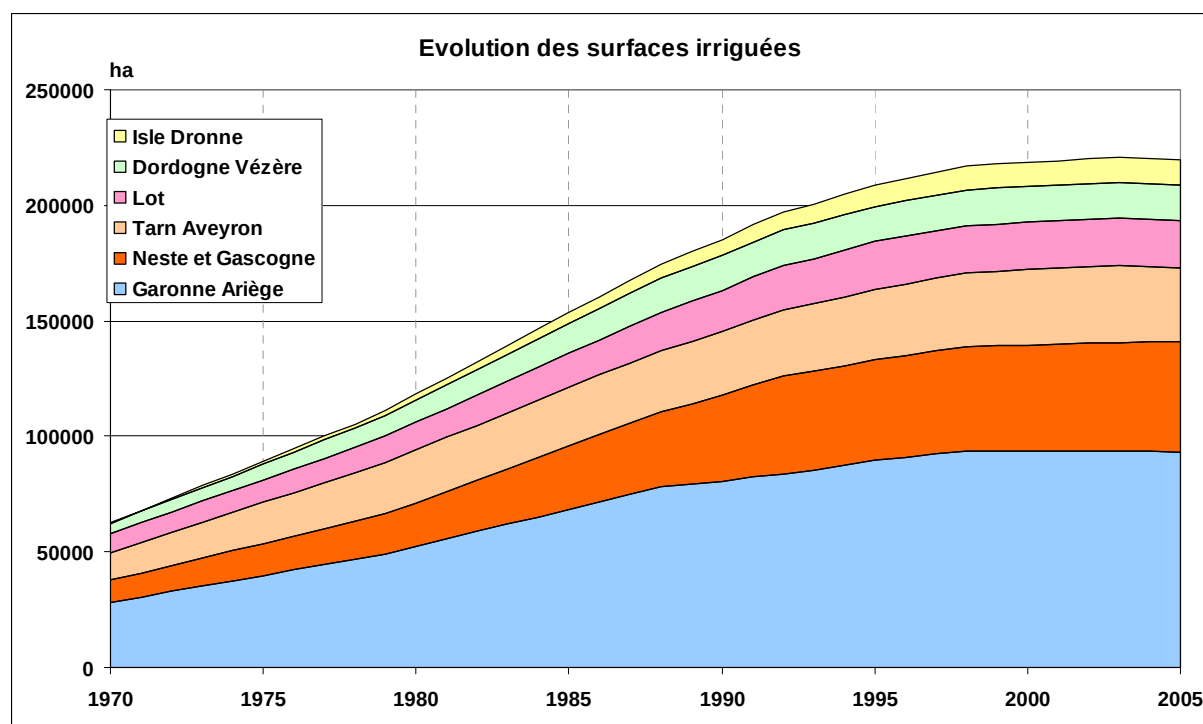
La gestion du bassin versant peut impacter sensiblement le régime hydrologique. D'autres incidences indirectes pourraient avoir des conséquences fortes. Ainsi, la gestion des berges, la maîtrise de l'érosion dépendent assez largement de la dynamique de la végétation mais aussi des pratiques culturales (approfondissement ou rehaussement des chenaux de drainage par exemple). Or le risque d'ensablement des cours d'eaux est souvent cité dans le Sage comme un facteur de dégradation important de la qualité hydromorphologique et écologique des rivières.

Des évolutions sensibles dans un sens ou dans l'autre pourrait avoir des incidences encore plus pénalisantes à long terme que la seule évolution du régime hydrologique.

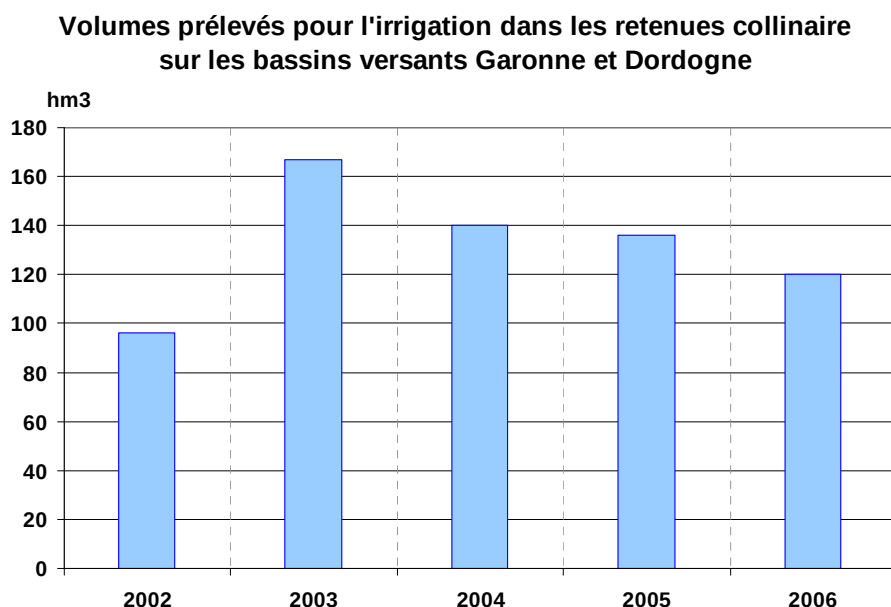
6.1.2.1 L'irrigation dans le grand bassin versant

Etat des lieux

Le développement de l'irrigation à partir des ressources superficielles est déterminante sur Adour Garonne. Pour la première fois un cumul historique des surfaces irriguées peut être établi grâce à la compilation des données de tous les plans de gestion d'étiage ; La courbe (provisoire) ci-dessous retrace de façon continue une évolution qui du point de vue géographique, s'est concentrée autour des grands axes fluviaux ou des petits axes dès lors qu'ils sont réalimentés (Dropt, Gascogne, Lèze, ...)



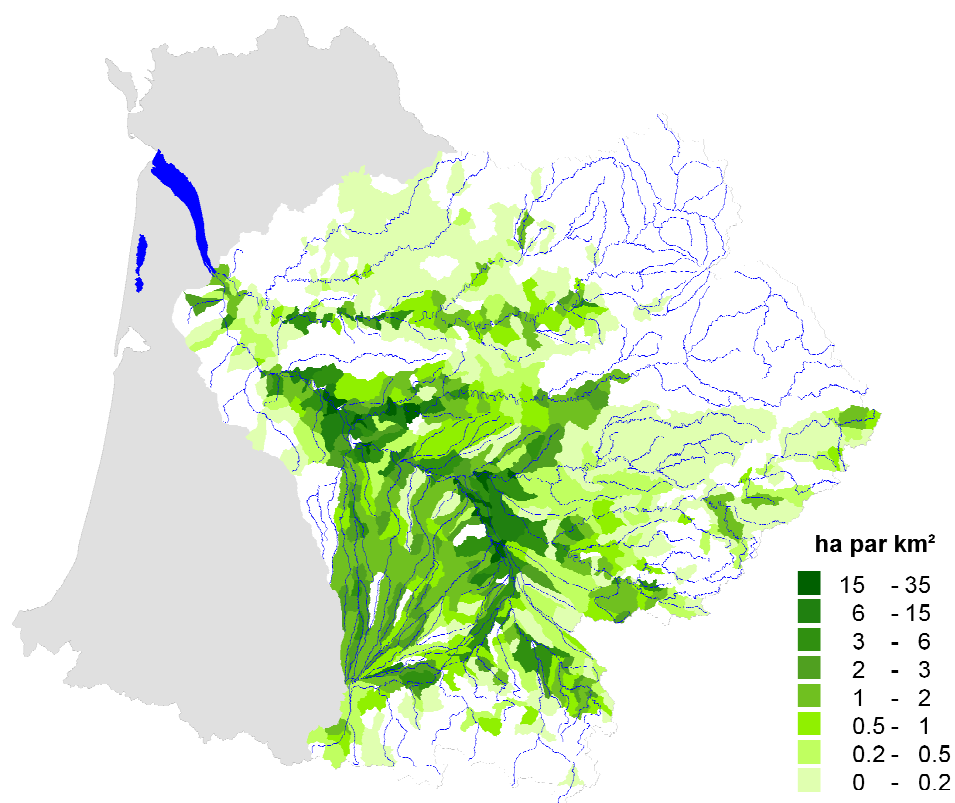
Le niveau des surfaces irriguées dépendant de la ressource superficielle et nappes d'accompagnement représente une pression de prélèvement instantanée qui peut être évaluée à plus de 100 m³/s en pointe et à environ 400 hm³ en année sèche auquel peuvent être rajoutés environ 150 hm³ de prélèvement dans les retenues collinaires. Heureusement, une partie de ces prélèvements est compensée par des opérations de soutien d'étiage.



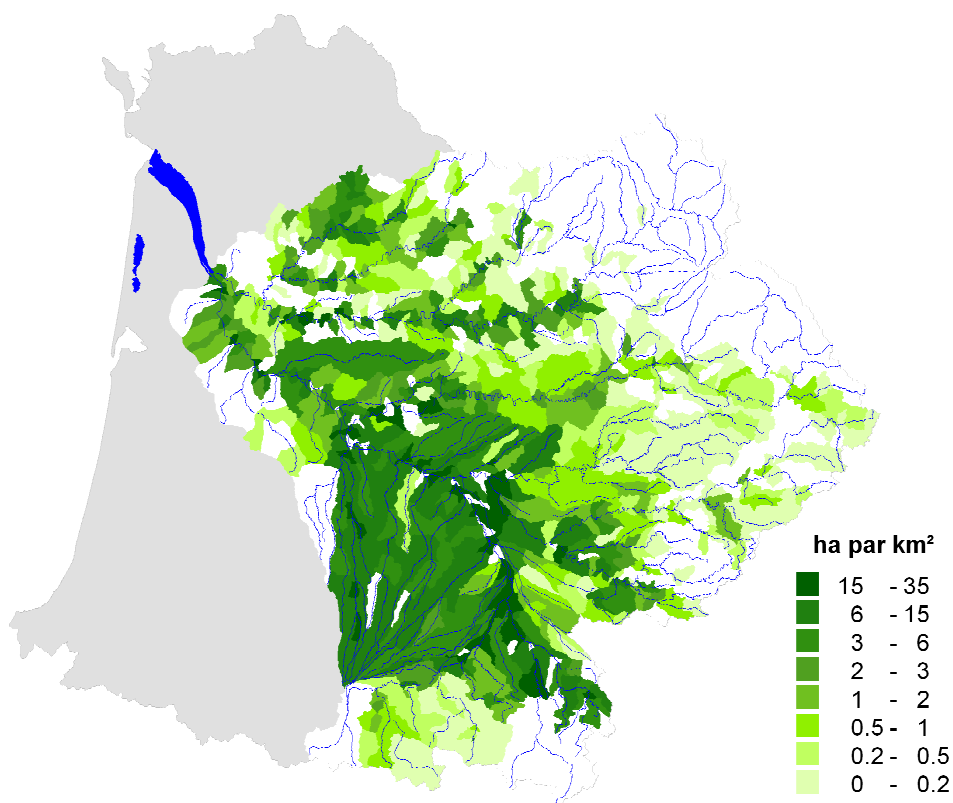
L'irrigation demain ?

Les fluctuations des cours agricoles sur les dernières années incitent à la prudence en matière de prospective. Nous avons assisté en quelques années à un développement de l'irrigation dont le maximum se situe vraisemblablement en 2003. Puis sous la double pression des mesures de restriction imposées par les déficits hydrologiques récurrents et par une valorisation économique moins attractive, les surfaces irriguées en grande culture se sont réduites (parfois jusqu'à -30%). Le transfert s'est effectué vers des cultures de printemps exploitées (encore) en mode pluvial. En 2007, l'explosion des prix agricoles a relancé l'intérêt pour l'irrigation. La possibilité de mise en culture des friches ouvre une certaine disponibilité foncière. Seule la ressource en eau reste un facteur limitant. Le projet de SDAGE et les Plans de Gestion des Etiages, l'obligation récente de définir des volumes prélevables en zone de répartition des eaux (l'essentiel du bassin versant de l'estuaire), constituent les seuls « garde fou » pour imposer le respect d'un flux d'eau douce estival à l'estuaire. Le SAGE devra confirmer ce message fort pour l'ensemble du bassin versant.

Surfaces irriguées en 1970



Surfaces irriguées en 2008

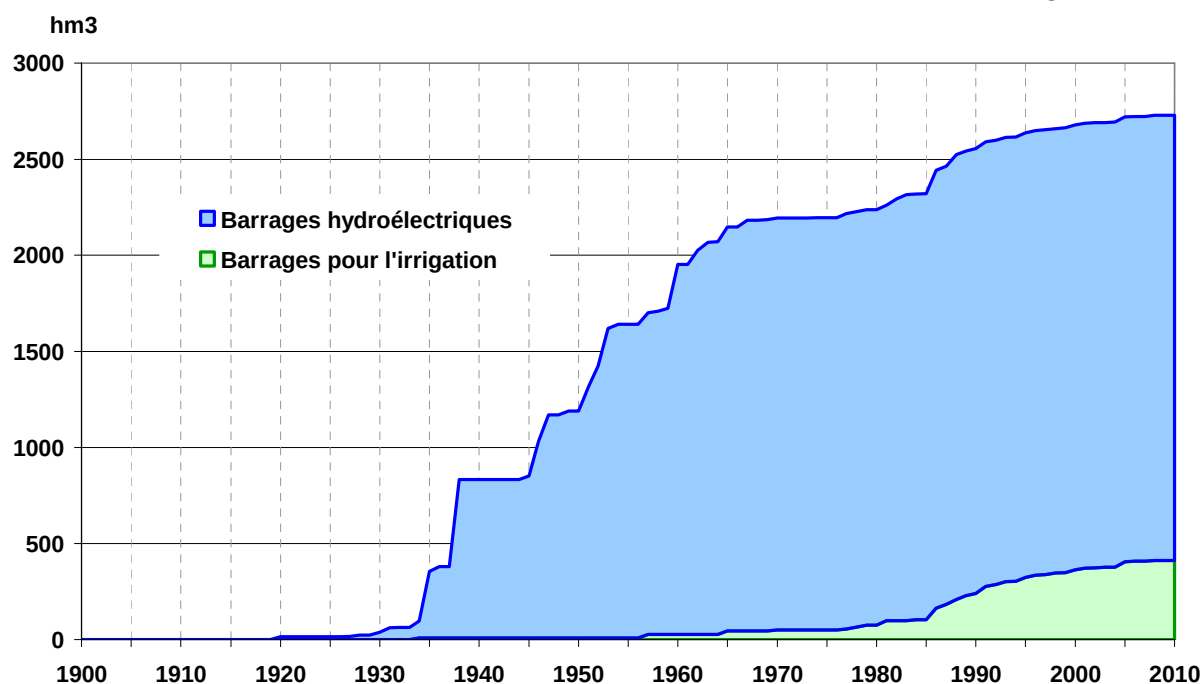


6.1.2.2 La grande hydraulique : hydroélectricité et agriculture

L'hydroélectricité (2 300 hm³) puis le développement des grandes retenues hydro-agricoles (410 hm³) et des collinaires (environ 200hm³) se sont traduits par un accroissement des volumes stockés sur le bassin. Aujourd'hui, en proportion, les 2 910 hm³ apparaissent limités par rapport aux volumes annuels drainés par l'estuaire (33 000 hm³). Ce niveau d'impact potentiel doit en fait être relativisé par les considérations suivantes :

- Une part des stocks (y compris hydroélectriques pour environ 150 hm³) sert à la compensation des prélèvements, l'autre au soutien d'étiage. Cela correspond à une atténuation des impacts en période d'étiage. Le développement de nouveaux ouvrages de réalimentation est fortement sollicité par le monde agricole.
- Une part des volumes est mobilisée plusieurs fois par an (hydroélectricité). Dans ce cas de figure ce sont les facteurs du régime hydrologique qui peuvent être modifiés. Cette situation est sensible en particulier sur les bassins du Lot (Truyère) et de la Dordogne susceptibles de mobiliser des débits instantanés importants (fonctionnement par écluses pour plusieurs centaines de m³/s).

Evolution des volumes stockés sur les bassins versants Garonne Dordogne



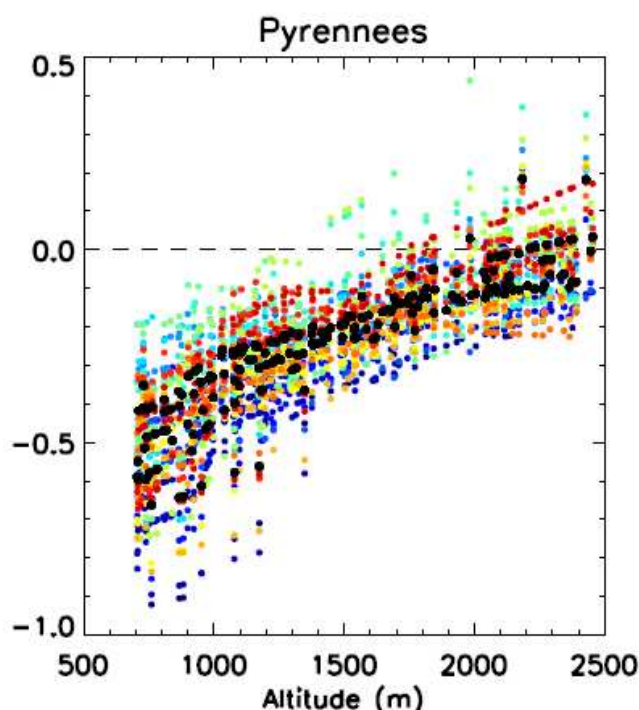
6.1.3 - Quels débits en 2030 ?

Les facteurs climatiques et humains seront coresponsables des futurs régimes hydrologiques de la Garonne et de la Dordogne.

Du point de vue climatique, les modélisations prospectives sont convergentes et prévoient une diminution des flux moyens annuels, une aggravation des étiages mais

restent incertaines sur les débits de crues (thèse de Julien Boe 2007 « [Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France](#) »).

Pour la Garonne, la réduction du manteau neigeux Pyrénéens est un **bouleversement majeur** car il induira des étiages estivaux dans les cours amont des cours d'eau qui ne connaissaient jusqu'alors que des étiages automnaux ou hivernaux (rétention neigeuse). Mais aussi, pour l'ensemble de la vallée de l'Ariège, de la Garonne et du Système Neste (plus de 60% des surfaces irriguées), **le soutien d'étiage naturel de la fonte** des neiges qui couvrirait environ la moitié de la campagne d'irrigation, devra être **substitué par des actions de déstockage**. L'équilibre d'ensemble pourrait donc être doublé et lourdement impacté sauf si la précocité des cultures permet un décalage au moins partiel du cycle d'irrigation. Les années récentes ont largement illustré la sensibilité du système à une fonte précoce.



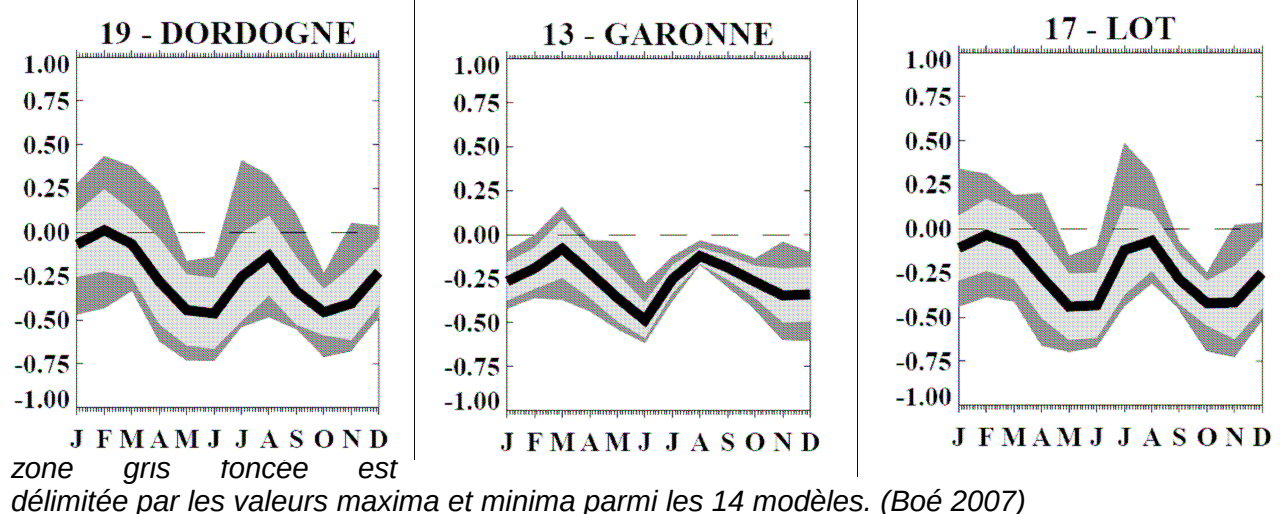
Changement relatif des précipitations neigeuses entre les périodes 1970/1999 et 2046/2065 en fonction de l'altitude. Chaque point correspond à une maille SAFRAN et chaque couleur à un modèle différent. La couleur noire correspond à la moyenne d'ensemble. J. Boe 2007.

La deuxième rétroaction très importante pourrait concerner la gestion des réservoirs hydroélectriques. Le régime des eaux entrantes dans les réservoirs d'altitude sera-t-il impacté dans les mêmes proportions que les grands bassins versants ? La gestion hydroélectrique évoluera-t-elle sous d'autres contraintes que les seules questions hydrologiques (production nucléaire estivale, évolution du profil annuel des consommations électriques) ? Les volumes affectés au soutien d'étiage auront-ils le même degré de disponibilité qu'aujourd'hui ?

En conséquence, les simulations effectuées à ce jour, et affinées par la régionalisation, montrent que le régime « naturel » des fleuves va décroître fortement au printemps

et en été : une baisse de 20% en juillet août paraît l'ordre de grandeur qu'il faut anticiper.

La figure précédente montre



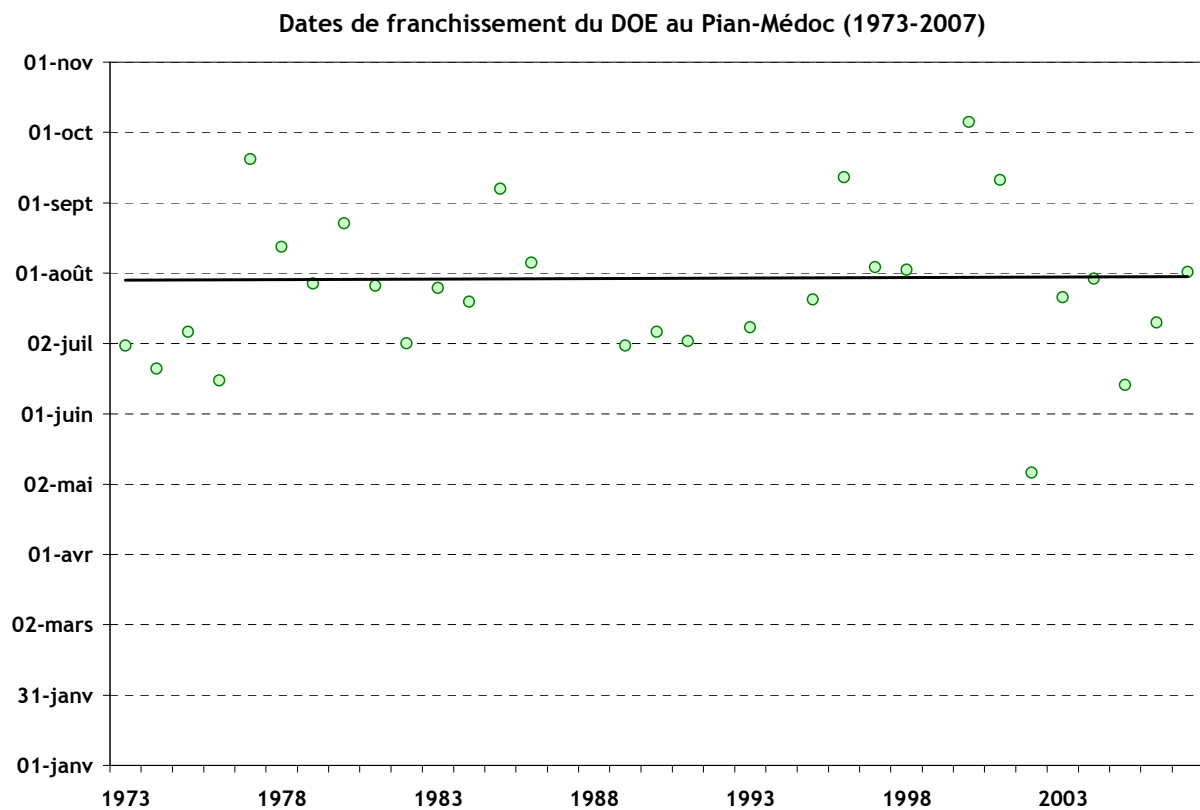
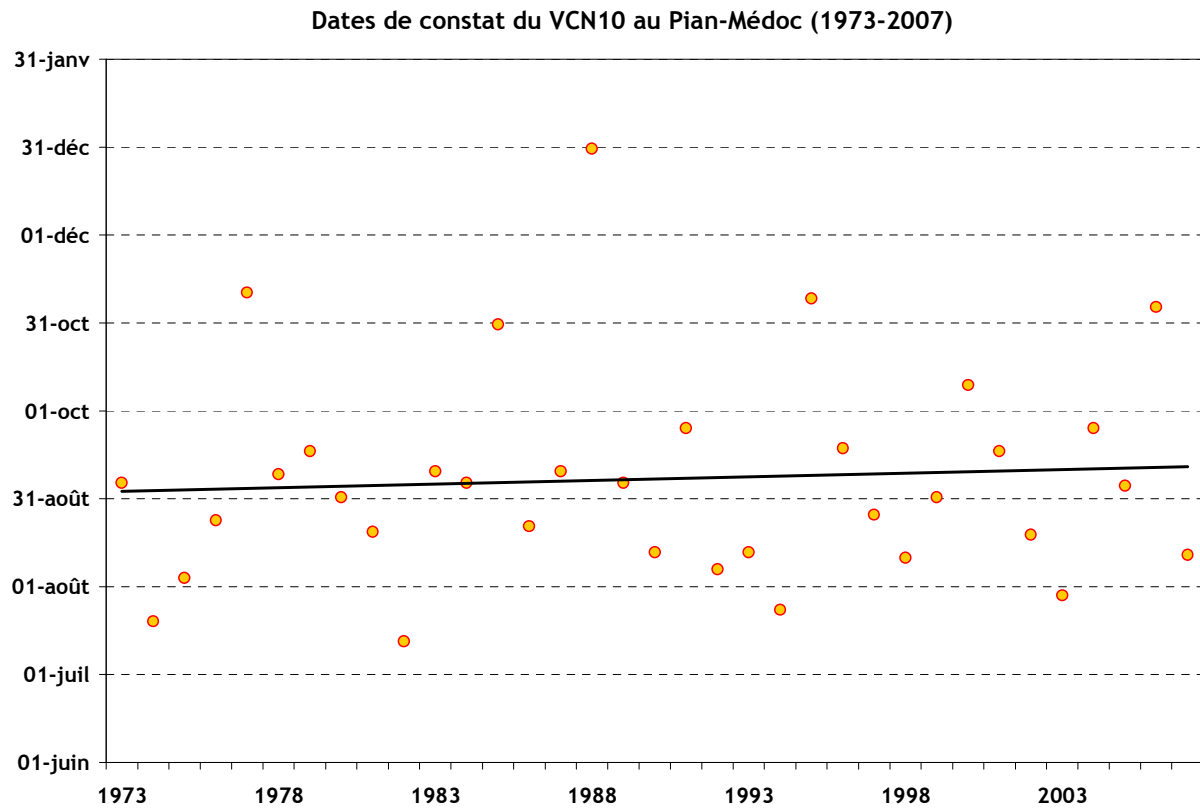
A l'estuaire les VCN 10 naturels sur la période 1970/2007 sont de l'ordre de 110 m³/s pour la Garonne et 45 m³/s pour la Dordogne. Une réduction de 20% des débits d'étiage représente donc environ 30 m³/s. Cette « perte » naturelle représente à elle seule la moitié du débit de soutien d'étiage et de compensation déjà mobilisé sur le bassin (556 hm³ sur 90 jours). Cette comparaison sommaire, devrait être affinée dans un modèle global de l'usage de l'eau sur le bassin. L'enjeu est soit de diminuer les prélèvements, soit de diminuer les objectifs, soit de développer la ressource en eau mobilisable pour du soutien d'étiage. L'amplitude du phénomène, s'il devait se confirmer met donc en péril une partie des équilibres hydrologiques poursuivis depuis plusieurs années.

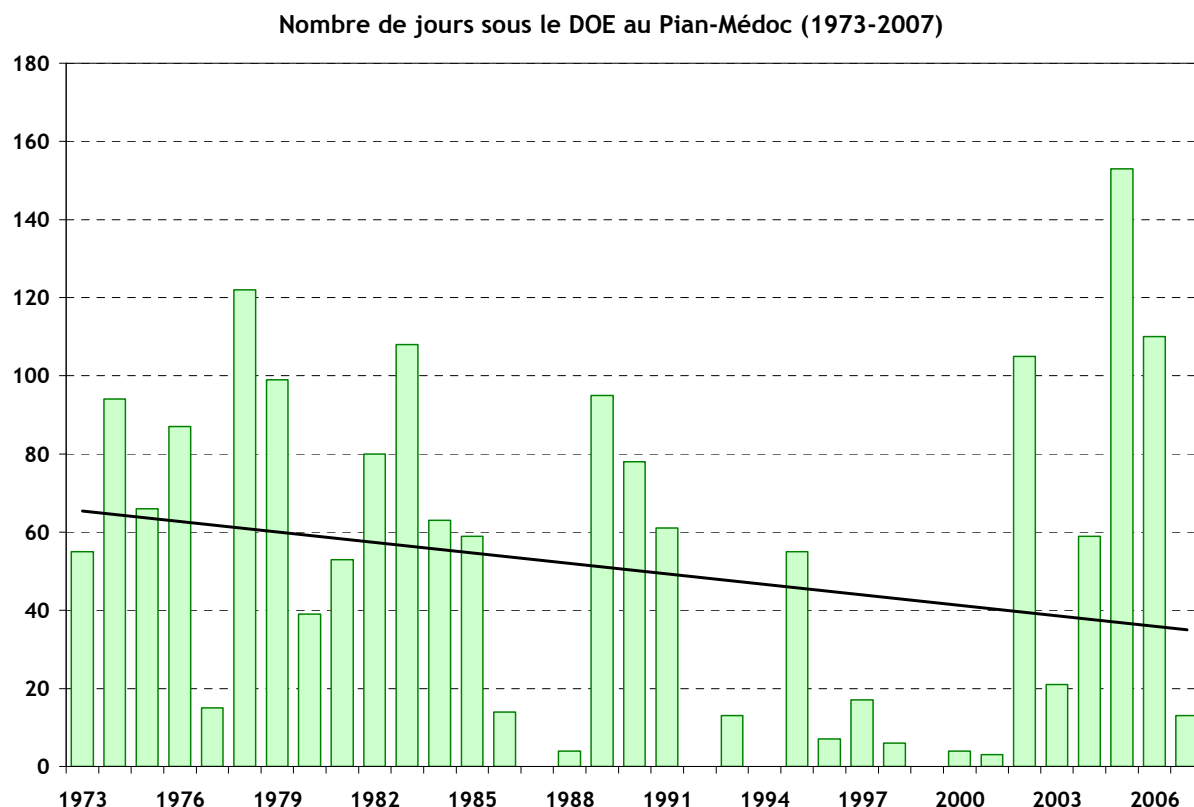
6.2 - Petits cours d'eau et zones humides

6.2.1 - Les petits cours d'eau

Les petits bassins versants du périmètre sont peu instrumentés et l'on ne bénéficie pas de chroniques sur de longues périodes.

L'illustration ci après montre que les modes de gestion du bassin versant peuvent générer des indicateurs contradictoires avec les tendances hydrologiques observées partout ailleurs. Pour la Jalle de Ludon, l'environnement urbain, l'évolution des prélèvements et des rejets conduisent à une réduction apparente du risque d'étiage !





Les suivis hydrologiques tendanciels sur le long terme devront forcément faire référence à de la modélisation pluie débit. [Une thèse en cours à l'Inra](#), qui ne concerne pas directement le territoire du Sage, pourrait cependant apporter des éléments utiles à une meilleure compréhension des mécanismes en jeu.

« La problématique consiste à distinguer les impacts des différents changements qui ont pu affecter le fonctionnement du paysage de la région, en terme d'occupation du sol, de techniques culturales et sylvicoles, ainsi que l'influence des aléas climatiques afin de mieux prédire les conséquences des changements à venir. Une meilleure connaissance des bilans à l'échelle du sous-bassin versant est donc nécessaire. Au cours de la thèse, des bilans du fonctionnement des systèmes seront constitués à l'aide d'outils de modélisation et de système d'information géographique (SIG) dans deux zones modèles : une à dominante forêt et une mixte (forêt et maïs). Ce travail réunira différentes compétences du laboratoire : modélisation du fonctionnement des couverts (modèle Graeco, Musica, STICS), SIG, télédétection, mesures isotopiques et dendrométriques, pour estimer la productivité à l'échelle du paysage sur les 25 dernières années. »

Les principaux domaines d'interaction sont :

- Les relations sol- nappe puis nappe- rivière avec les travaux en cours sur la caractérisation du plioquaternaire.
- Le rôle du drainage en forêt, sous grande culture et sous vigne (la polémique est souvent vive sur ce point).
- L'évolution des sols forestiers avec l'aggravation ou non du risque d'érosion sableuse.
- L'incidence sur les bilans hydrologiques d'ici 2040.

Cet enjeu est essentiel pour la gestion qualitative des petits cours d'eau mais aussi des annexes hydrauliques qui en dépendent dont les zones humides et zones de marais.

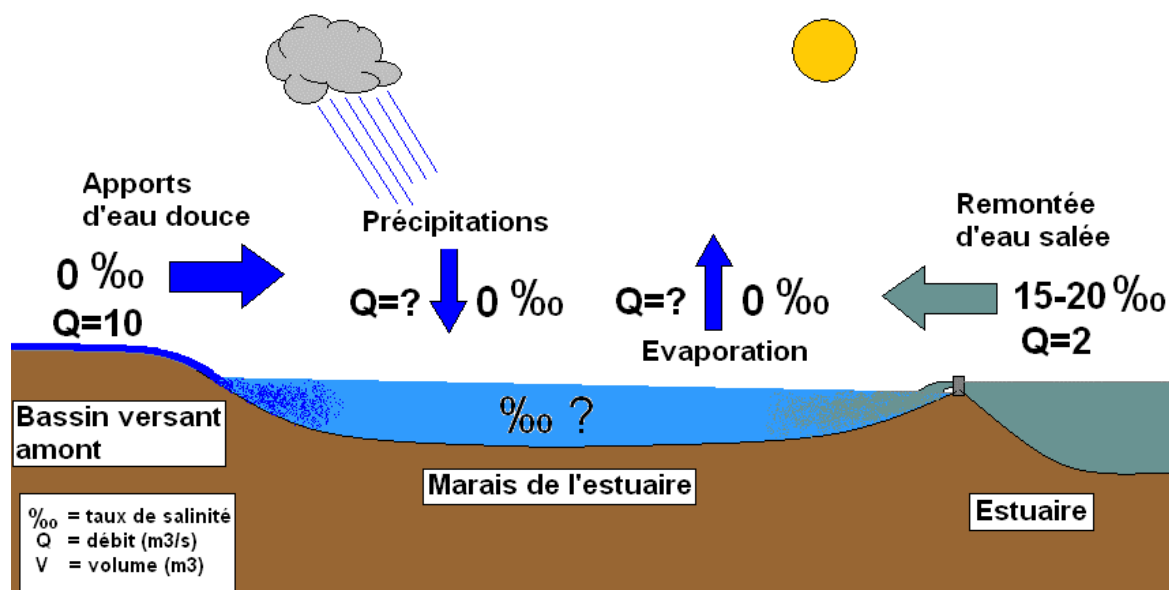
6.2.2 - Les Zones humides

Il n'existe pas de chronique concernant l'évolution de l'état des zones humides associées aux petits cours d'eau ou aux émergences de nappe. La qualification de l'état hydrique de ces zones dans le calendrier hydrologique reste à construire. Par ailleurs l'incidence des drainages ou des abaissements piézométriques (liés à l'exploitation des aquifères ou à leur baisse naturelle) nécessite des études au cas par cas. Globalement, l'extension de la phase de bas niveau des eaux souterraines devrait se traduire par des assèchements plus fréquents et plus longs.

Pour les zones de marais en bordure de l'estuaire la question est plus complexe. Nous avons vu que l'élévation du niveau moyen estuarien, peut avoir des conséquences sur la gestion des vannes qui ne peuvent être globalisées dans la mesure où chacune d'entre elles, est calée à un seuil spécifique. De plus, le tassement des tourbes en fond de marais peut avoir des effets difficilement réversibles sur la gestion de basses terres ou des répercussions fortes sur les contraintes de gestion de niveau imposées aux autres usagers du marais. Les pratiques agricoles mais sans doute aussi les épisodes caniculaires pourraient avoir des effets sensibles sur le niveau des sols. Il subsiste encore de grandes inconnues sur le lien entre topographie des zones de marais tourbeux et climat. Or ce sujet a des répercussions importantes non seulement sur l'inondation des territoires mais plus largement sur leur mise en valeur et donc l'intérêt de leur protection (digues et chenaux).

Par ailleurs, l'évolution de la salinité de l'estuaire sous le double effet de la réduction des flux d'eau douce et de l'augmentation du niveau moyen océanique, devraient être suivies avec attention pour permettre un accompagnement des procédures (dérogation préfectorale) qui permettent une alimentation en eau des marais à partir des eaux estuariennes en substitution à un déficit d'apport d'eau douce continentale.

La dégradation des bilans des apports continentaux d'eau douce et de la consommation interne au marais pourrait conduire plus de gestionnaires à maintenir les niveaux par une introduction d'eau estuarienne. En cas d'interdiction de manœuvre de vannes, cela se fait sur dérogation préfectorale et au risque et péril du gestionnaire. Les principaux risques sont liés à l'intrusion d'eau saumâtre. L'étanchéité très performante des vannes modernes ayant cloisonné de façon marquée l'écosystème, définit un domaine d'eau douce nettement séparé du domaine estuarien. La gestion de cette zone de transition impose une grande progressivité dans les changements de salinité pour prévenir les mortalités piscicoles sous l'effet du choc osmotique. Cette progressivité permet une gestion de la dilution ou des comportements d'évitement des poissons. Il apparaît donc important d'anticiper cette question.



Schématisation globale montrant la potentialité saline du marais

Mais au-delà de l'enjeu migrateur et des enjeux des usagers, se pose de nombreuses questions quant à l'adaptabilité de l'écosystème et des usages aux nouvelles conditions physico-chimiques engendrées par une élévation du taux de salinité dans les marais.

6.3 - Les eaux souterraines

Les mots clés de la gestion des nappes au contact de l'estuaire sont les suivants :

- Recharge des aquifères
- Biseau salé
- Maîtrise piézométrique

Le plioquaternaire est la nappe phréatique principale du périmètre avec un fonctionnement hydrologique mal connu dans son détail mais qui se caractérise par un fort renouvellement annuel, et globalement une grande abondance. Le drainage forestier et agricole ainsi que l'irrigation pèsent sur le bilan de cette nappe de façon complexe.

Le SAGE nappes profondes s'occupe essentiellement des aquifères captifs sous jacents avec une très forte préoccupation pour l'eau potable. Le risque de modification irréversible sur le plan qualitatif a conduit à une gestion rigoureuse des volumes prélevables. Cependant cette situation pourrait être fortement remise en cause si les bilans de drainance et de recharge devaient être impactés par les changements globaux.

Selon le Smegreg, « il n'existe aucune étude générale, voire même ponctuelle, sur l'impact de ces changements sur les eaux souterraines et a fortiori profondes. L'impact que l'on peut attendre du réchauffement climatique sur les eaux souterraines est de deux ordres : direct ou indirect.

- Impact direct : des périodes sèches estivales plus longues et des précipitations hivernales plus courtes et plus intenses, qui favorisent le ruissellement, sont peu propices au renouvellement du stock d'eau souterraine.
- Impact indirect : la moindre disponibilité des eaux superficielles se traduira, à besoin constant, par un transfert des prélèvements vers les eaux souterraines, réduisant encore les possibilités d'apport de ces dernières aux milieux superficiels.

Il est donc urgent d'étudier de manière approfondie l'impact du réchauffement climatique à la fois sur l'alimentation des nappes et sur les usages qu'elles devront satisfaire.

Enfin, il est nécessaire d'étudier les possibilités d'améliorer l'alimentation des nappes, que ce soit en favorisant les processus naturels (limitation du ruissellement), ou par alimentation artificielle, et ce du point de vue techniques, écologiques, sanitaires et économiques. »

6.4 - La température des eaux estuariennes

6.4.1 - Constat

L'évolution de la température atmosphérique impacte directement la température des eaux océaniques mais aussi des cours d'eau. L'estuaire de la Gironde qui mélange ces eaux, a vu sa température augmenter régulièrement en période estivale : presque 2,5°C en 30 ans. (in QUINTIN J.Y. (coord.) *et al.* (2007) – Surveillance écologique du site du Blayais, année 2006. Rapp.IFREMER RST DYNECO/AG/07-02, mars 2007, 220 p.)

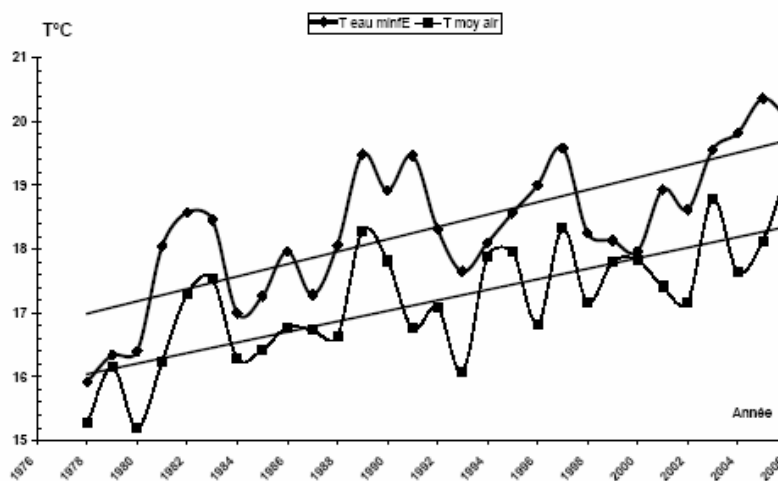
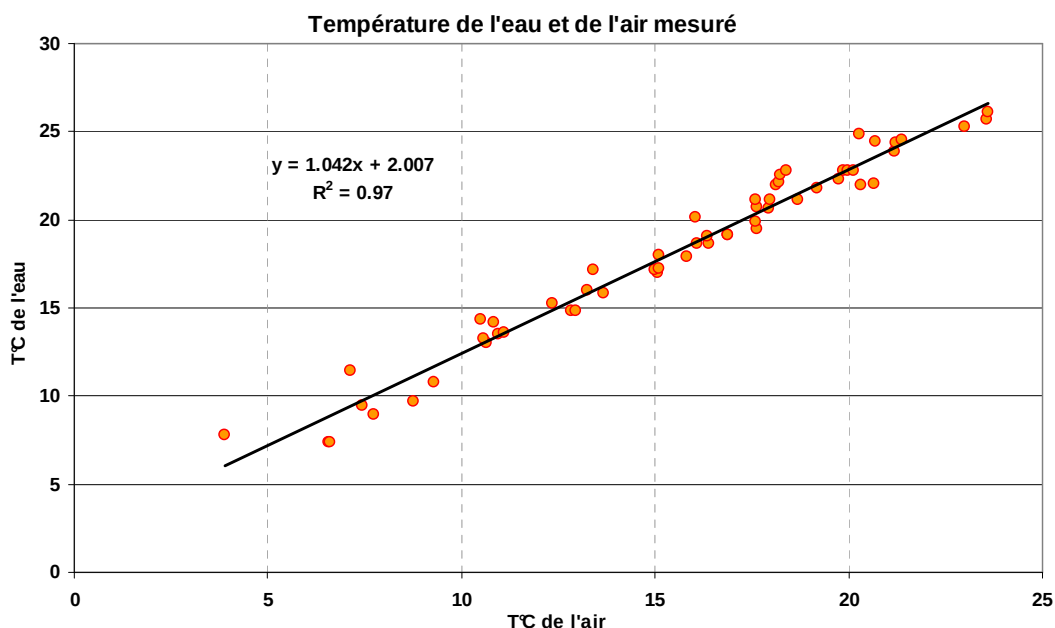


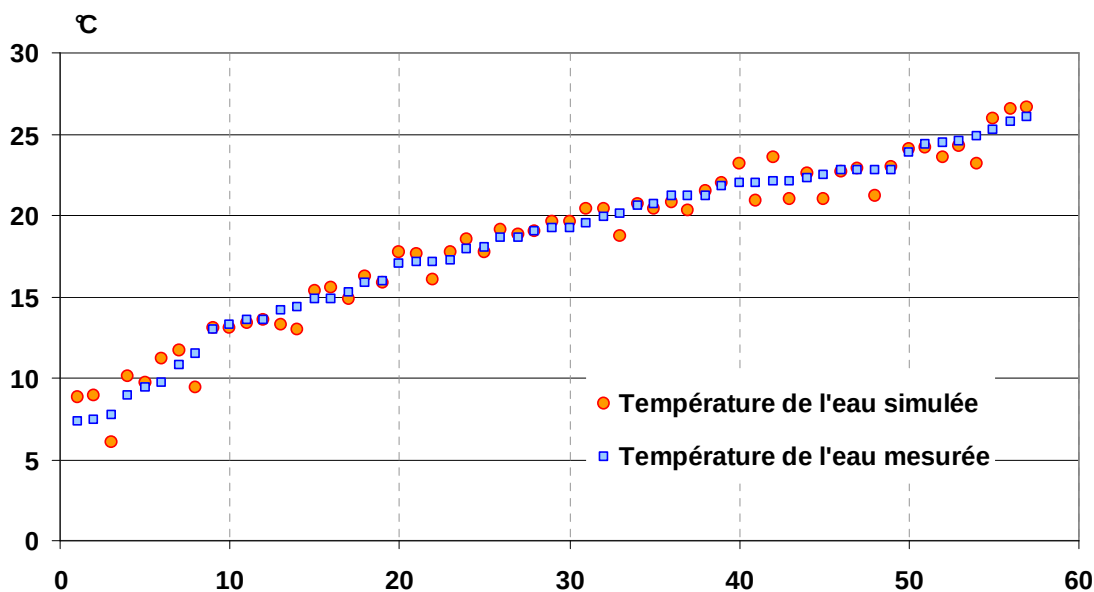
Figure 4-8 : Evolution relative des températures moyennes de l'air et de l'eau près du fond au point E PK 52 au cours de la période 1978-2006 (de mai à novembre)

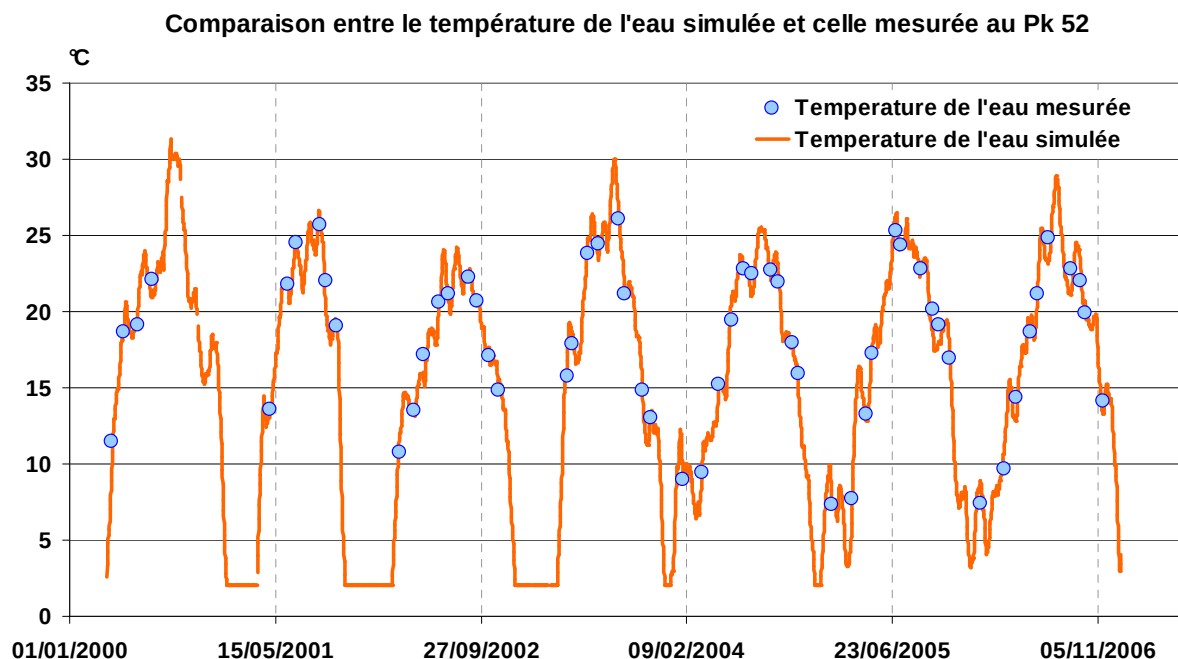
6.4.2 - Modélisation de la température

La température des eaux de l'estuaire de la Gironde est étroitement corrélée aux conditions climatiques et particulièrement à la température de l'air. Le graphique suivant présente les températures de l'air moyennes sur 16 jours consécutifs enregistrées à Mérignac et qui précèdent la mesure de la température moyenne journalière de l'eau au Pk 52 (données SOMLIT).

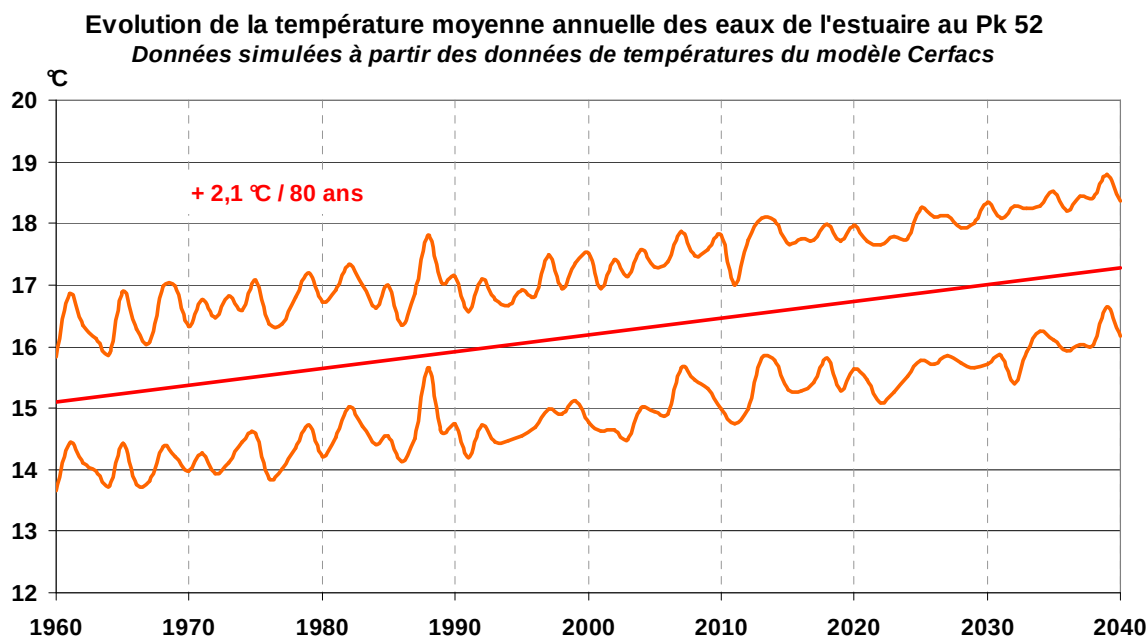


Cette corrélation permet ainsi de simuler la température de l'eau au Pk 52 à partir des températures de l'air mesurée à Mérignac. Le graphique suivant présente les résultats obtenus.





Cette relation peut permettre de reconstituer la température des eaux de l'estuaire sur de longues périodes et également d'anticiper les variations de la température des eaux estuariennes à partir des prévisions de changement climatique réalisées par le Cerfacs pour les quatre prochaines décennies.

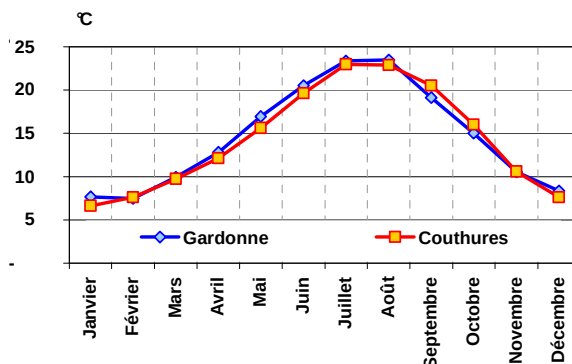


Cette méthode de calcul de la température de l'eau ne permet toutefois pas de prendre en compte les variations au sein de la journée de la température de l'eau. Or la température fluctue non seulement avec le cycle nyctéméral mais aussi avec le cycle de marée. Ceci limite la capacité à décrire les incidences sur certains usages en lien étroit avec les variations instantanées (CNP du Blayais en particulier).

6.5 - La température des eaux douces

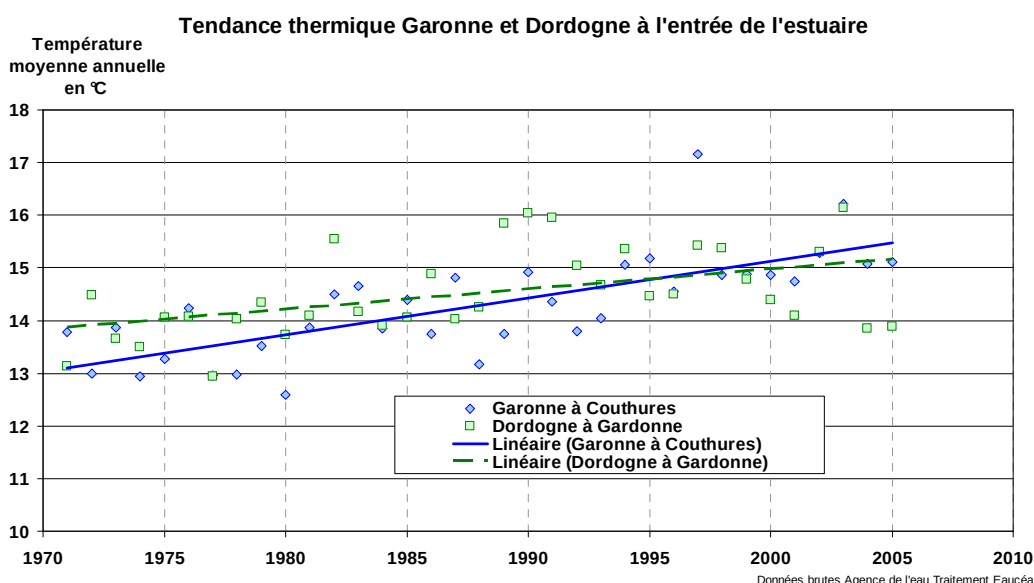
Ce paramètre n'est suivi sur le long terme qu'au travers des réseaux de l'Agence de l'eau. Les suivis sont généralement des mesures mensuelles dont les plus anciennes remontent à 1971.

Température des eaux °C	Dordogne Code station 05047000 Gardonne	Garonne Code station 05081000 Couthures
Janvier	7.6	6.6
Février	7.5	7.6
Mars	9.9	9.7
Avril	12.8	12.1
Mai	16.9	15.6
Juin	20.5	19.6
Juillet	23.4	23.0
Août	23.5	22.9
Septembre	19.1	20.5
Octobre	15.0	16.0
Novembre	10.5	10.6
Décembre	8.4	7.6
année	14.6	14.3



Le traitement des données du RNB, de 1971 à 2005 (dernières valeurs disponibles) a nécessité plusieurs étapes compte tenu de la fréquence parfois aléatoire de l'échantillonnage (normalement un par mois). Nous avons recalculé pour chaque mois de chaque année la moyenne des données mensuelles de manière à ramener l'échantillon à une valeur par mois et par an. En cas de données manquantes pour ne pas créer de distorsions fortes en raison de la forte variabilité saisonnière de la température, nous avons remplacé la donnée manquante par la moyenne des températures longue période correspond à ce mois.

La tendance générale est au réchauffement. On note cependant un comportement moins « linéaire » de la Dordogne qui pourrait s'expliquer par l'insuffisance des mesures en fin de période. Cette différence de comportement thermique nécessite cependant une analyse plus fine pour éventuellement distinguer des impacts de l'activité humaine (hydroélectricité sur la Dordogne, nucléaire sur la Garonne, rôle des nappes alluviales, ...).



A notre connaissance, sur les petits cours d'eau ou dans les zones de marais, ces chroniques de mesures sont exceptionnelles ou absentes.

L'essentiel de la température d'équilibre d'un cours d'eau dépendant de la température atmosphérique (apport de nappe et végétation jouant un rôle localement), il doit être possible d'avoir une estimation assez fiable des évolutions historiques et futures de ce paramètre majeur de l'écosystème.

6.6 - La salinité estuarienne

La salinité est suivie au travers de différents réseaux dont Somlit. Cependant, l'interprétation spatiale et temporelle des fluctuations de ce paramètre sur l'estuaire rend très utile l'appel à un modèle distribué. L'IFREMER (Pierre Lehir) a développé pour la Seine un modèle hydrodynamique et sédimentologique applicable aux estuaires ([Modèle Siam 3D](#)).

L'hydrodynamique est gérée en 3D et forcée par le niveau des marées et les débits amont. Un modèle de transport par advection/diffusion permet de modéliser les transferts particuliers et dissous. Cette dernière composante peut être exploitée pour des modèles de biodégradation ou de transfert de polluant. Elle est aussi valorisable au travers de simulation de la salinité.

Une application à la Gironde a été mise en œuvre par A. Sottolichio dans le cadre de sa thèse. Un des « sous produits » de cette modélisation est une estimation de la salinité qui peut donc être appréciée sur chacune des mailles de calcul de l'estuaire et pour chaque pas de calcul.

Des extractions faites sur des scénarios simulés par le modèle sont comparées aux données enregistrées par les sondes MAREL. Elles permettent d'apprécier la précision du calcul. Il apparaît que celle-ci est plutôt satisfaisante à Pauillac, plus incertaine à Bordeaux.

Il en ressort cependant que :

- Les simulations permettent de décrire la salinité dans sa diversité spatiale (latérale et longitudinale) en fonction des conditions hydrologiques et de marée. Des restitutions cartographiques pour quelques situations contrastées sont possibles (interpolation). Il est aussi possible d'extraire des chroniques de salinité correspondant à des scénarios prédéfinis en débit et en marée, pour quelques points caractéristiques. Ces chroniques généreront des stations MAREL virtuelles (données du modèle) à partir desquelles un travail de corrélation permettra d'extraire les fonctions prédictives simplifiées : $\text{Salinité} = f(\text{Q Dordogne} + \text{Garonne} ; \text{Marée})$. Les interpolations entre stations devraient suffire à décrire l'ambiance saline probable en tout point de l'estuaire.
- La modélisation est contrainte par le pas de temps du calcul et le nombre de calculs réalisables. Une chronique de 10 mois consécutifs est envisageable. Les scénarios seront établis en croisant un débit Dordogne + Garonne fictif continu sur un mois consécutifs croisé avec le vrai cycle de marée d'une année donnée, soit 10 scénarios de débits.

Le modélisateur doit prévoir les points sur lesquels seront extraits les fichiers de données à traiter ultérieurement (station fictive), la fréquence de la donnée (pas de temps horaire). Un scénario d'augmentation du niveau de la mer sera testé sur le même jeu d'hypothèses.

Les constats actuels montrent une tendance à la remontée vers l'amont des influences salines dans l'estuaire.

6.7 - Les autres paramètres physico chimique

L'acidification des océans et le réchauffement induisent des conséquences majeures sur les mécanismes biochimiques. Le pH, l'oxygène, les différents composés chimiques des eaux estuariennes suivent des cycles complexes en interaction avec l'écosystème et qui lui aussi sera soumis à des évolutions probables.

La dynamique des pollutions métalliques, cadmium, cuivre, mercure, constitue un problème important pour l'estuaire de la Gironde. Les cinétiques de solubilisation depuis la phase particulaire dans les vases vers les eaux estuariennes sont en effet largement réglées par les paramètres physiques (brassage des sédiments naturel ou artificiel) et chimiques (salinité, pH). Il sera intéressant de mettre en perspective les ordres de grandeurs des changements attendus sur ces paramètres qui régulent les cinétiques actuelles vis-à-vis de l'enjeu qualité des eaux.

Les évolutions prospectives de ces paramètres d'une part et les conséquences envisageables d'autre part sont encore largement du domaine de la recherche.

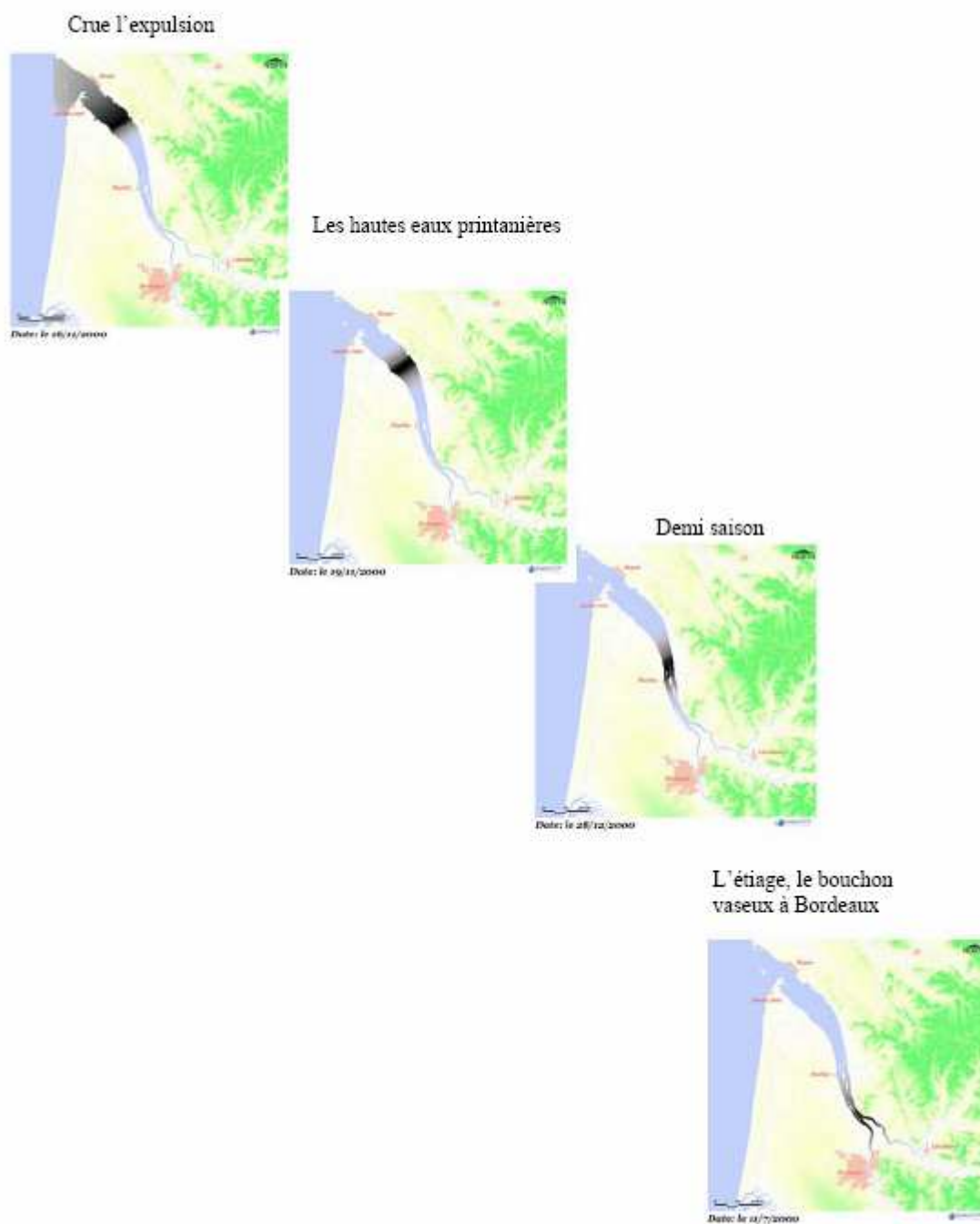
6.8 - Le bouchon vaseux

6.8.1 - Position

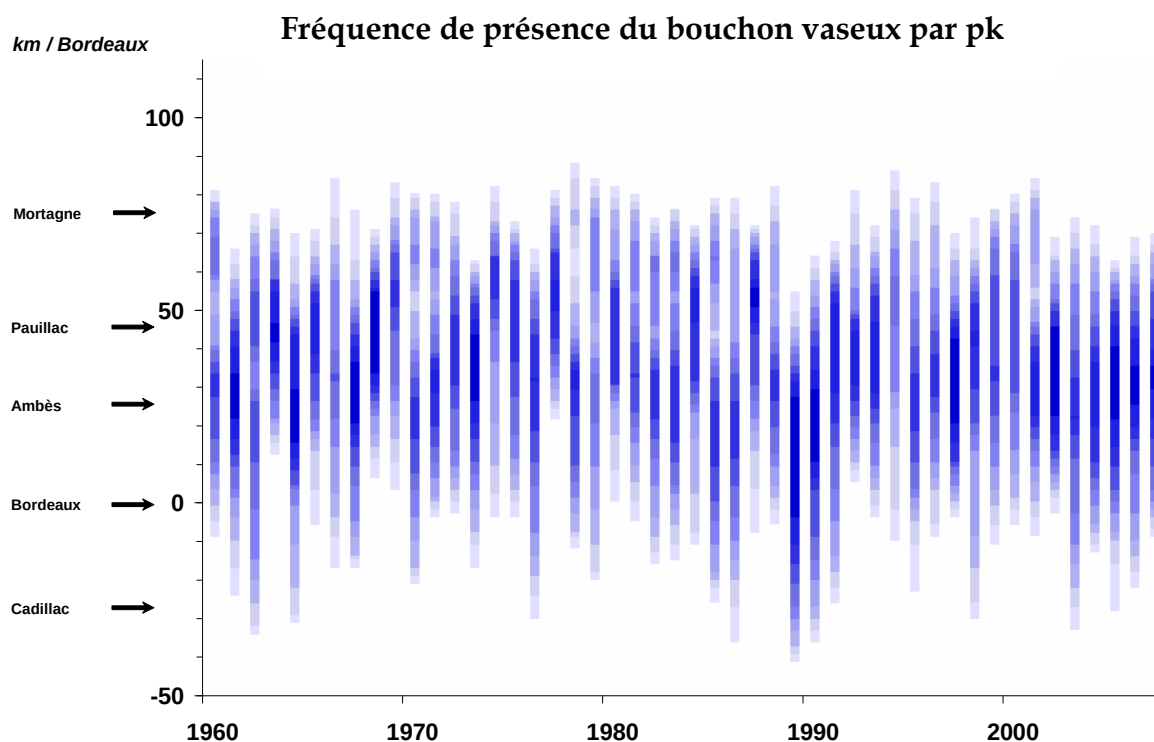
La modélisation du bouchon vaseux développé par Eaucéa sur la base des travaux universitaires couvre à la fois des paramètres de position dans l'estuaire et de qualité des eaux.

Un modèle dynamique a été construit afin de rendre compte au pas de temps journalier de la position du bouchon.

Les quatre saisons du bouchon vaseux



Le graphique ci après illustre le nombre de jours de présence du bouchon vaseux, par année, distribué par pk. Ce graphique ne fait pas encore apparaître, sur la longue période, de tendance forte d'une augmentation du nombre de jours de présence du bouchon vaseux sur l'amont.



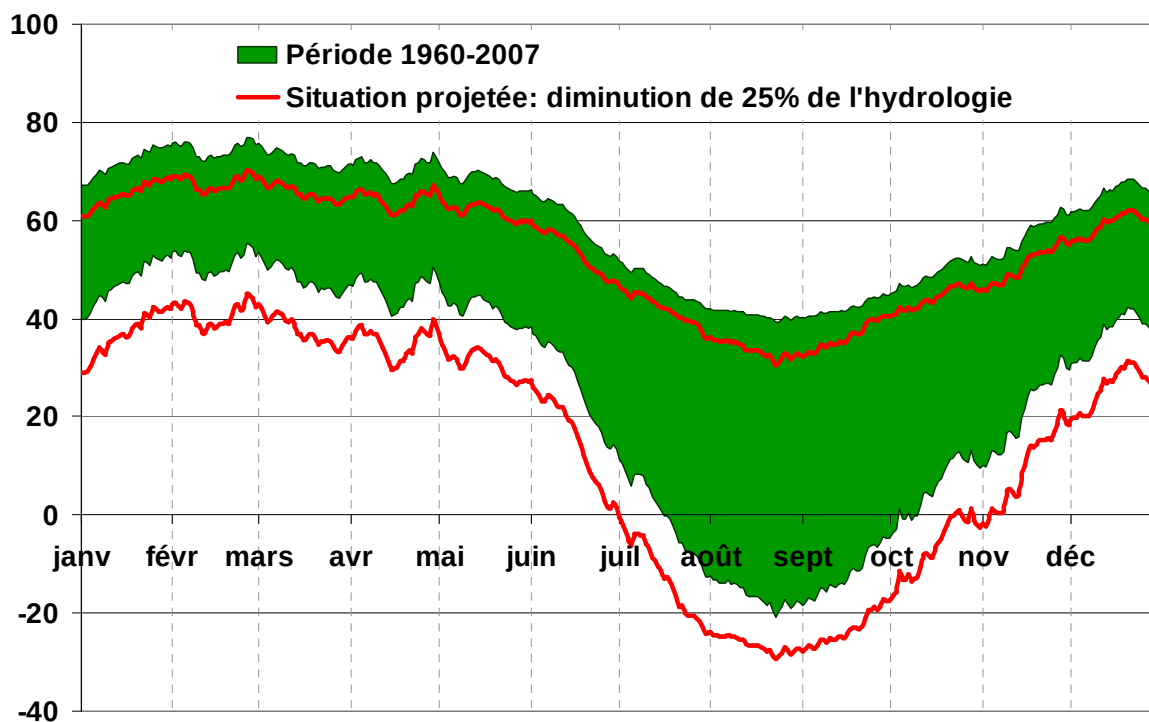
Parmi les critères importants pour le futur, les débits de la Garonne et de la Dordogne jouent un rôle essentiel.

Le positionnement attendu du bouchon vaseux dans le futur devrait être fortement impacté par l'évolution du régime des eaux de la Garonne. Le schéma ci-dessous illustre dans le calendrier annuel ce transfert vers l'amont du bouchon vaseux. Le pK 0 est situé à Bordeaux, les valeurs négatives en amont, les valeurs positives en aval. Les conséquences en matière de qualité des eaux, de bouchon anoxique et d'impact écologique sont sans doute très importantes même si tout n'est pas expertisé à ce jour.

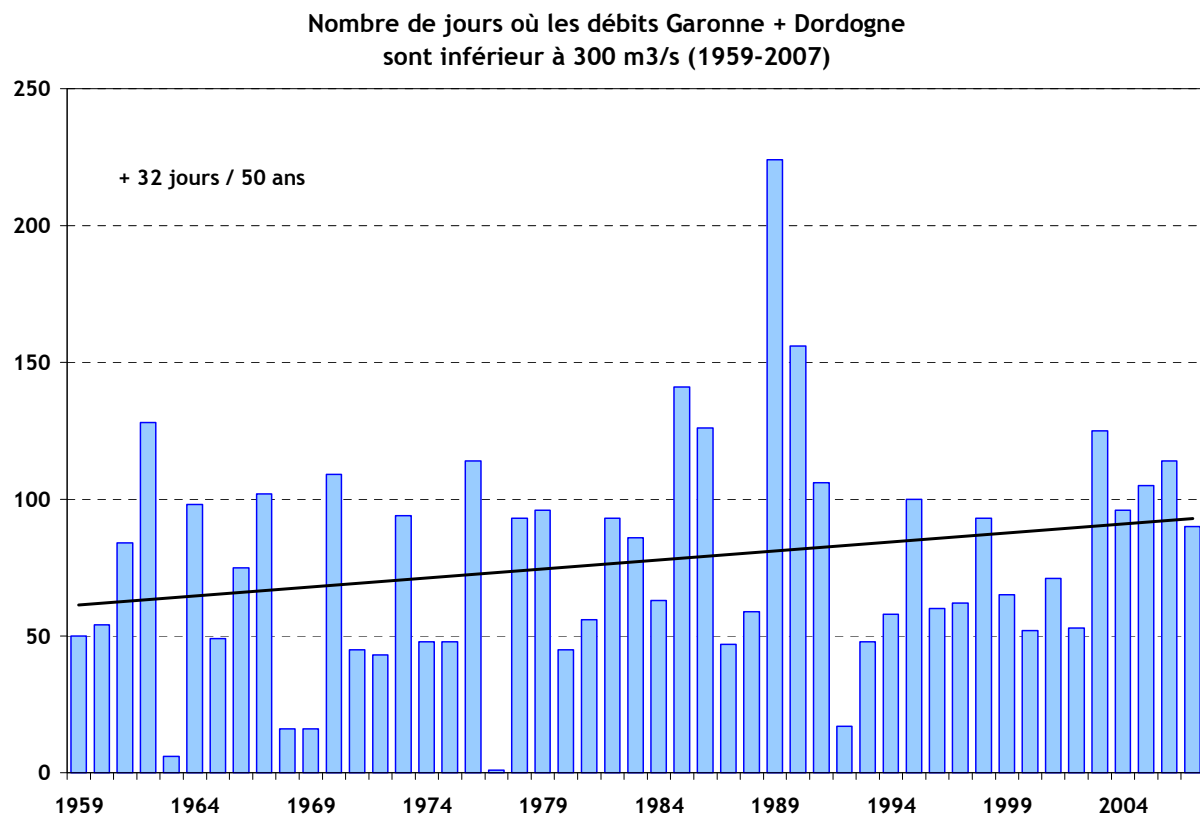
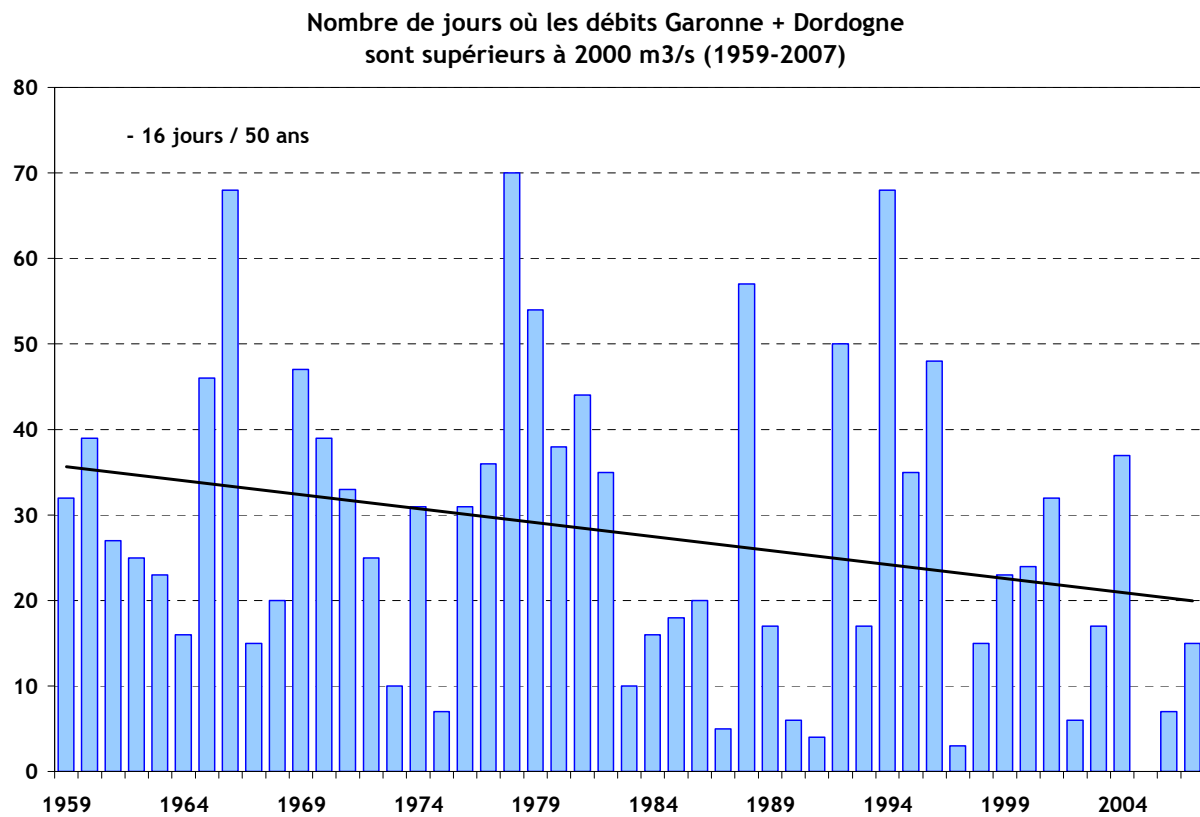
Pour établir des projections précises sur le futur, le principal paramètre manquant à ce jour est l'hydrologie de la Garonne et de la Dordogne.

Positionnement médian du bouchon vaseux au cours de l'année

km / Bordeaux



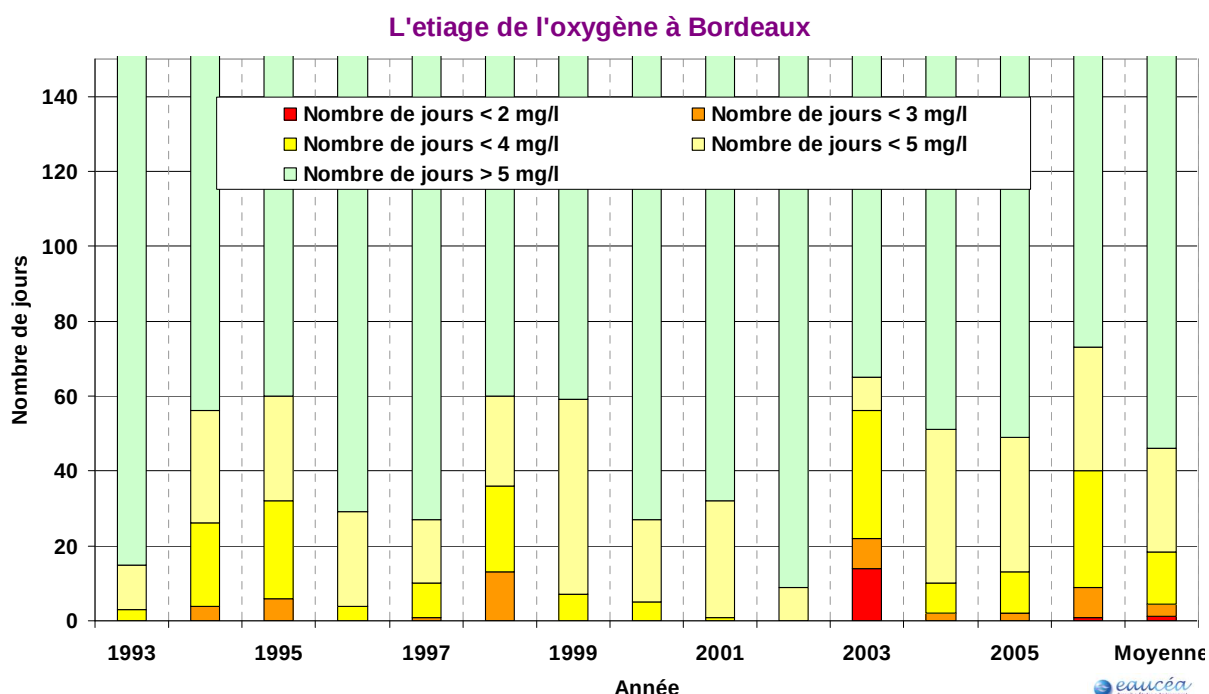
Les conditions favorables à l'expulsion du bouchon ont pu être réexaminées sur la période historique : on constate une raréfaction régulière de ces conditions favorables (débit supérieur à $2000 \text{ m}^3/\text{s}$) alors que les conditions de stationnement du bouchon vaseux en position haute sont plus fréquentes (débit inférieur à $300 \text{ m}^3/\text{s}$).



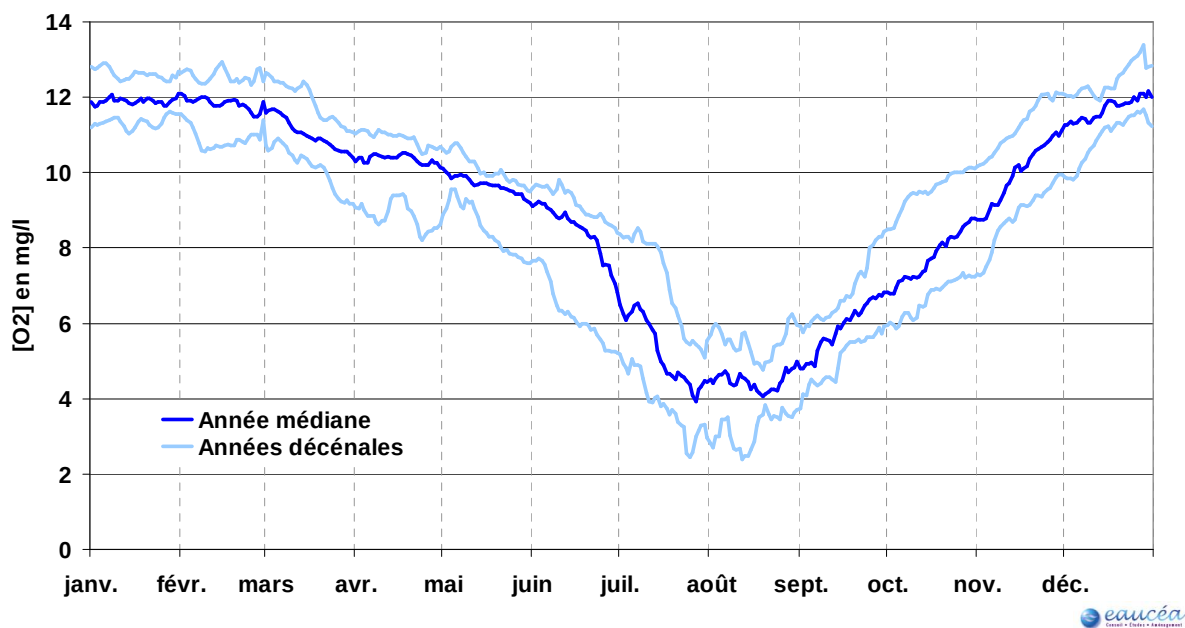
6.8.2 - Qualité des eaux

Pour l'aspect qualitatif, deux secteurs géographiques particuliers ont été simulés : Libourne et Bordeaux. Le paramètre le plus sensible est la teneur en oxygène dépendante à la fois de la turbidité donc du cycle de marée et des débits amont mais aussi de la concentration en matière organique.

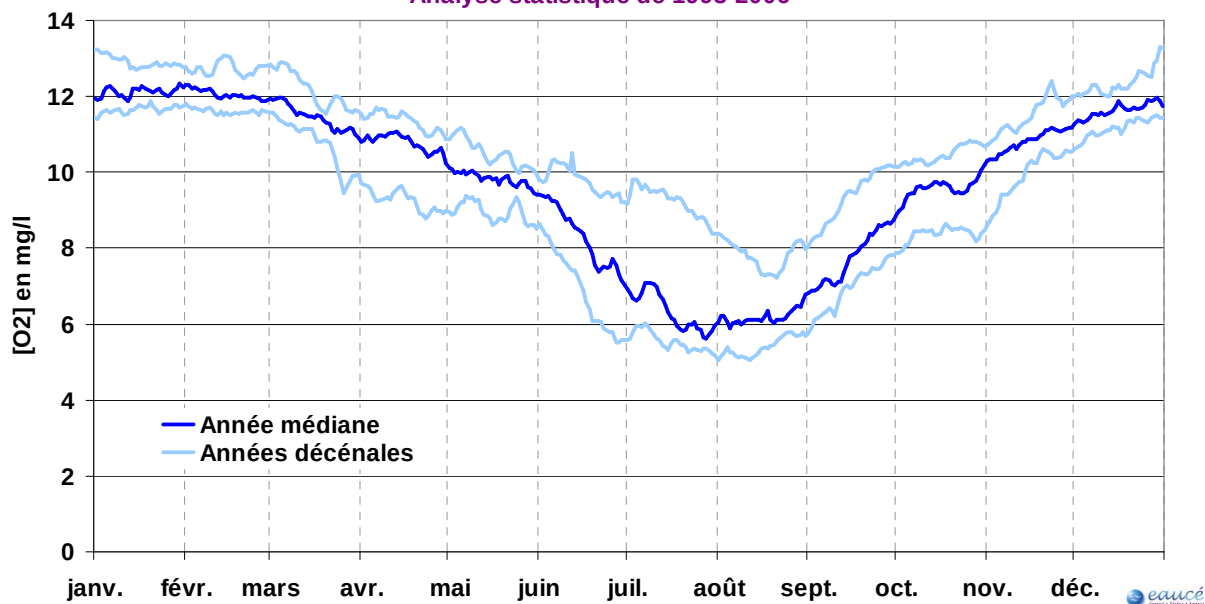
La présence de rejets importants au niveau de l'agglomération bordelaise (rejets chroniques et par temps d'orage) induit des phases déprimées pour l'oxygène. Les niveaux atteints sur la Garonne ont nécessairement des conséquences sur l'écosystème même si tout n'est pas parfaitement compris à ce jour. Ainsi, des travaux en cours dans le cadre du SAGE (MIGADO/Eaucéa) essaient d'établir des liens avec les migrations des saumons et des aloses.

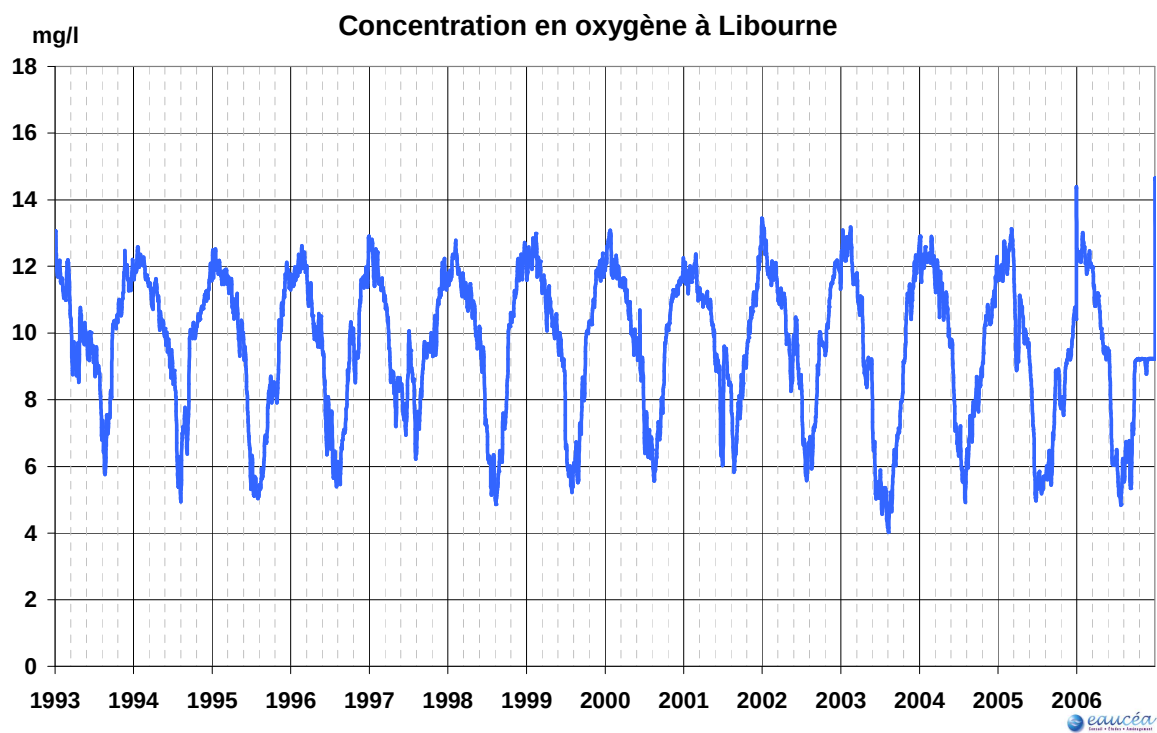
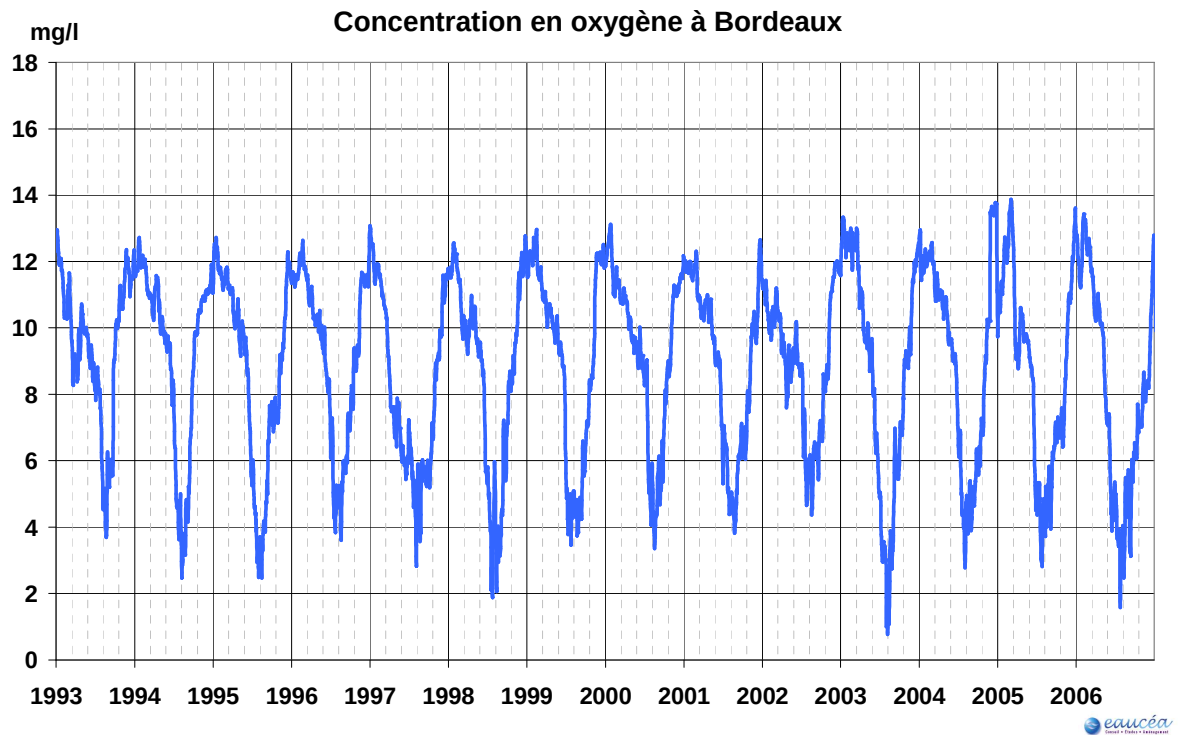


Régime de l'oxygène à Bordeaux
Analyse statistique de 1993-2006



Régime de l'oxygène à Libourne
Analyse statistique de 1993-2006



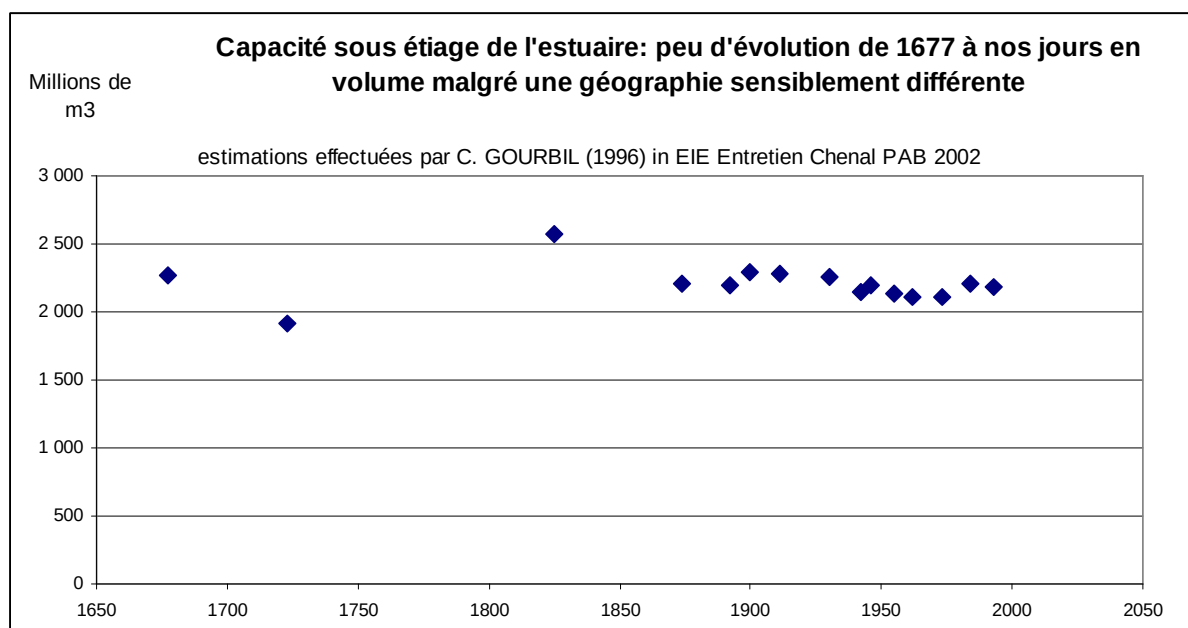


6.9 - Géographie et dynamique de l'envasement

6.9.1 - Evolution historique

L'évolution sédimentaire naturelle de l'estuaire devrait être son comblement progressif sous l'effet de la sédimentation des apports continentaux qui pourrait être renforcé par l'élévation du niveau de la mer.

Sur les derniers siècles la géographie des rives a été fortement impactée au XVIII^{ème} siècle par la poldérisation qui a favorisé le colmatage des zones de marais sur plusieurs milliers d'hectares (les mattes). Les îles et les bancs ont eux aussi évolué. Cependant, malgré ces modifications qui concernent les zones périphériques de l'estuaire, il est remarquable que le volume à l'étiage a globalement peu évolué.



6.9.2 - Les dragages d'entretien du PAB : un lien étroit avec l'hydrologie

Le PAB réalise des dragages d'entretien du chenal de navigation afin de maintenir les profondeurs nautiques du chenal. Les produits de dragage sont déposés dans des zones dites de clapage. Les mécanismes sédimentaires sont caractérisés par une succession de séquence de décantation et de reprise qui concerne pour l'essentiel des vases. Les sables eux se déplacent surtout au fond par charriage et saltation. L'étude d'impact pour l'entretien du chenal et des installations portuaires établie pour le PAB en 2002 apporte une très riche information sur les phénomènes en jeu :

« Sur les 8,4 M de m³ dragués en moyenne annuellement pour le maintien des profondeurs nautiques, 6,9 M de m³ (soit 82 %) correspondent à de la vase contenant de faibles proportions de sable (5 à 10 % environ).

Dans des conditions hydrauliques défavorables (période de renverse de courant au cours d'une marée de morte-eau) et en présence du bouchon vaseux, la hauteur de l'envasement peut atteindre plus de 0,60 m en 2,5 heures. Ce résultat appliqué par exemple à la passe de Goulée donne un volume de vase déposé en 2,5 heures de près de 500 000 m³.

Au cours de la sédimentation la vase présente des états physiques différents : liquide, visqueuse, solide entre la surface et le fond du dépôt. Selon la concentration du lit de vase et la vitesse du courant s'exerçant au-dessus du dépôt, la vase pourra être remise en suspension partiellement ou en

totalité. Au cours d'une marée de vive-eau la masse de vase érodée sur une passe du chenal peut s'élever à 200 000 t.

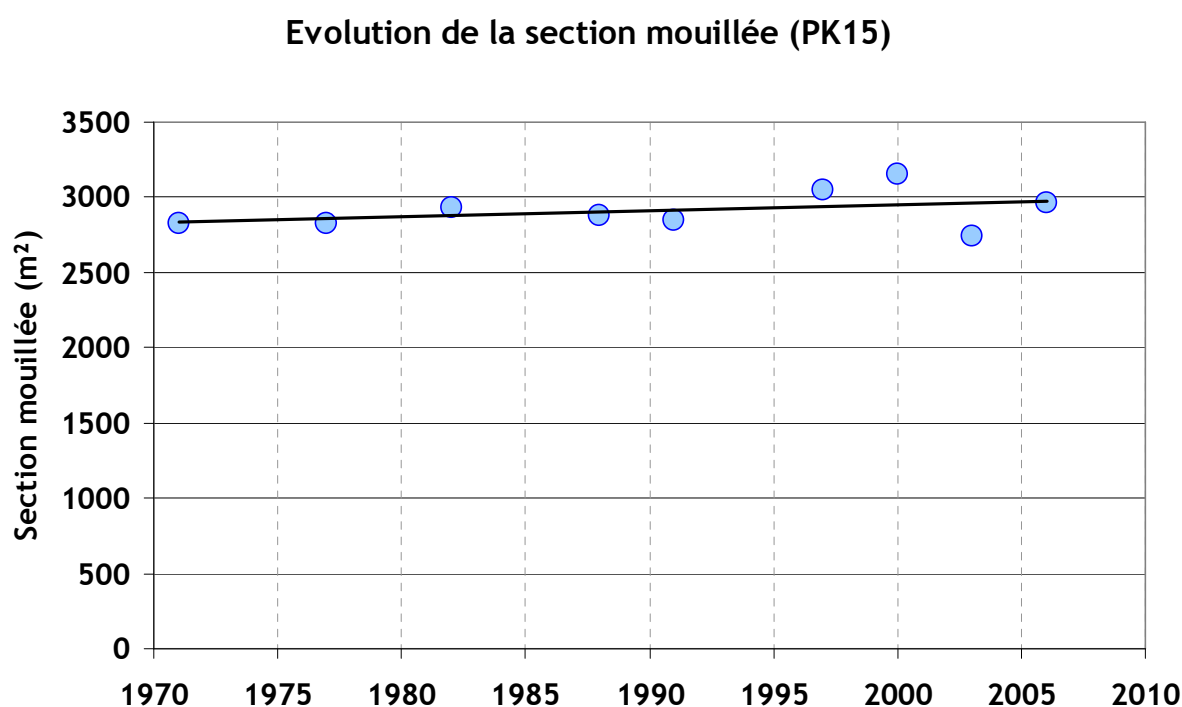
Dans le cas le plus général l'érosion ne concerne que les niveaux supérieurs du dépôt, les niveaux inférieurs non repris par les courants entraînent un exhaussement des fonds qui devront être restaurés par des interventions de dragage. »

L'analyse opérationnelle des opérations de dragage par le PAB leur suggère que le bouchon vaseux est le « moteur » principal des mécanismes de dépôt. Sa présence prolongée sur certains secteurs favorise le mécanisme de dépôt et donc les nécessités d'intervention. **La géographie des interventions (dragage et immersion des sédiments dragués) est donc et sera en lien étroit avec la dynamique de ce bouchon vaseux très largement dépendante de l'hydrologie fluviale.**

L'évolution sédimentaire de l'estuaire est donc bien soumise à deux actions fortes :

- Celle de la nature qui avec l'augmentation du niveau de la mer favorise globalement une sédimentation accrue dans l'estuaire en prolongement des tendances millénaires.
- Celle de l'interaction débit fluvial et action d'entretien qui détermine la géométrie du chenal et de ces marges.

Evolution de la section mouillée de la Garonne au Point Kilométrique PK15



De 1971 à 2006, la valeur de la section mouillée au PK15 varie peu. Sur les années considérées, la valeur de la section mouillée varie de 2740 à 3160m² (variation de 15%), avec une moyenne de 2910m². On peut observer une légère tendance à l'augmentation de la section mouillée.

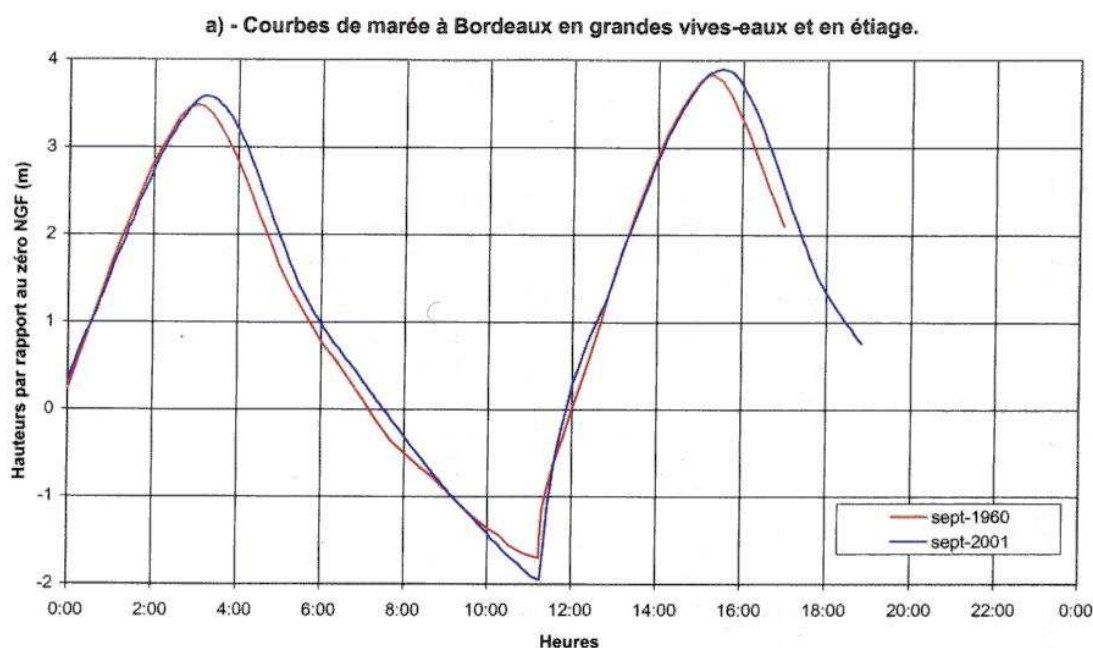
6.9.3 - Effets hydrauliques

Sur le plan hydraulique, le fait majeur est donc la modification de la géométrie de la section d'écoulement qui devrait se traduire par une modification des champs de vitesses.

On peut par ailleurs noter que les travaux de P.Castaing, H.Etcheber, A.Sottolichio, R.Cappe ont montré que « les aménagements de la Garonne maritime ont tous eu pour but l'amélioration des profondeurs par concentration de la puissance hydraulique. Ils ont entraîné un autotragage des fonds, donc une diminution des frottements, ce qui intensifie le gonflement de la marée. Le caractère hypersynchrone de l'estuaire a donc été accentué. De plus, les extractions de graviers en amont de Bordeaux ont joué un rôle capital. En effet, elles ont engendré un enfoncement du lit et une modification des caractéristiques des fonds, plus vaseux et donc plus lisses aujourd'hui » (cf. étude sur l'« Evaluation de l'évolution hydrologique et sédimentaire du système Garonne-Dordogne-Gironde, Volet 1 »).

6.9.4 - Fluctuations des niveaux d'eau dans le domaine fluvial

Ils ont également caractérisé l'évolution des courbes de marées entre 1960 et 2001 (cf. graphe ci-dessous).



Ils concluent que les aménagements de la Garonne (extraction des graviers et approfondissement du chenal) lors de ces 4 dernières décennies ont conduit à une augmentation du marnage, ainsi qu'à une augmentation des volumes oscillants, avec des conséquences possibles sur les gradients de salinité.

La question de l'évolution de ces paramètres sur les prochaines années est aujourd'hui largement mise en relation avec l'aménagement estuarien.

7 - CONSEQUENCES DIRECTES DES ÉVOLUTIONS DES PARAMÈTRES DE L'HYDROSYSTÈME SUR LES USAGES

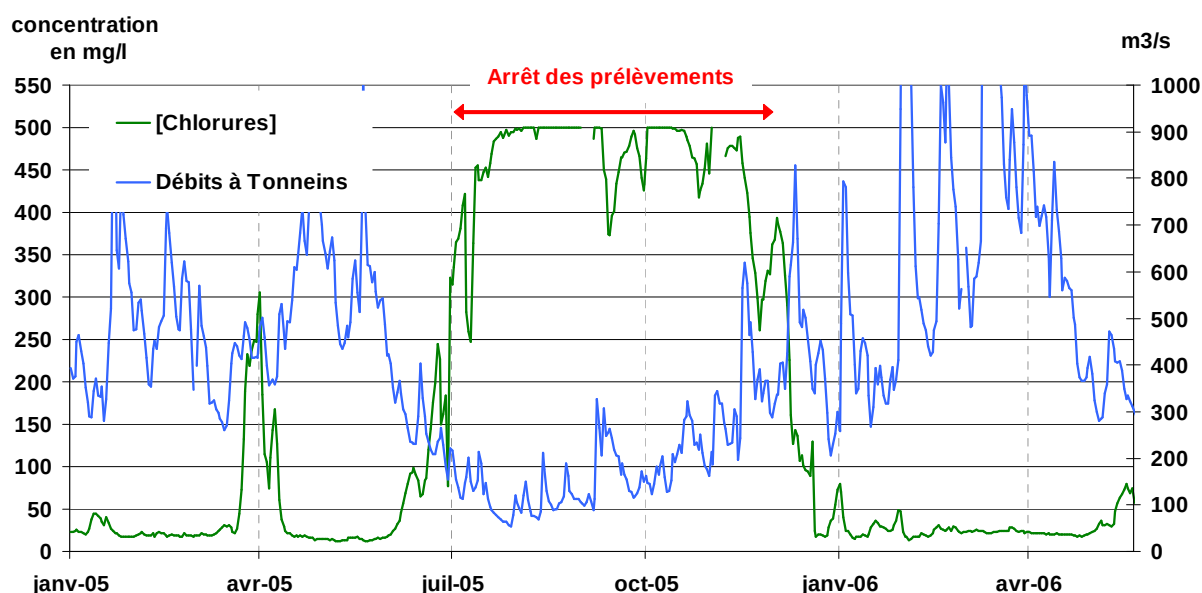
7.1 - Remise en perspective des stratégies de préservation des ressources en eau potable souterraine

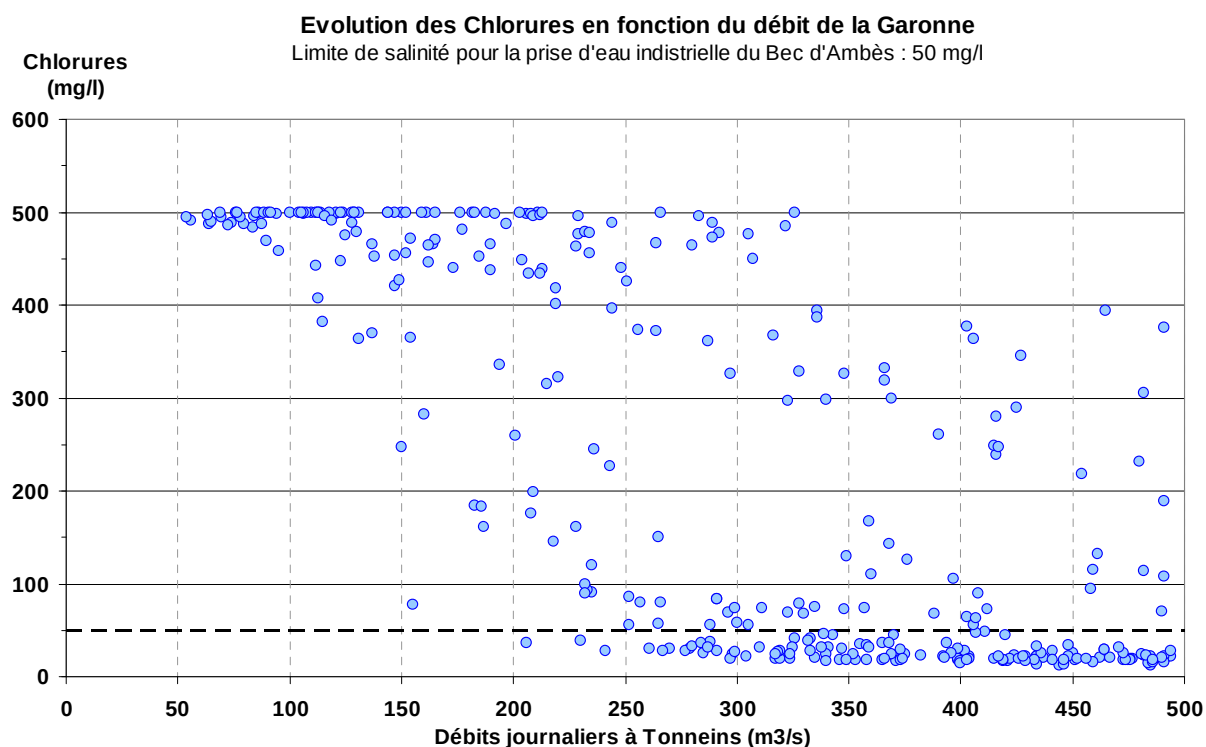
La Gironde dépend à plus de 95% des eaux souterraines pour la production d'eau potable. Pour maîtriser les évolutions piézométriques, le Sage Nappes Profondes de Gironde, a proposé une stratégie visant à réserver au maximum ces ressources à la production d'eau potable. Des transferts de ressource sont donc promus pour les autres usages. Cette option conserve son actualité avec les conséquences possibles de l'élévation du niveau de base marin et une demande potentielle en eau potable qui accompagne une démographie en expansion.

Ces transferts pourraient se voir partiellement compromis si les ressources de substitution envisagées ne garantissent plus un niveau de « service » compatible avec l'usage :

- Les industries du bec d'Ambes ont basculé dans le cadre du SAGE de l'Eocène vers les eaux estuariennes via des plans d'eau de décantation. Or, l'évolution de la salinité, paramètre rédhibitoire pour l'usage industriel, risque d'interdire de plus en plus fréquemment ces transferts.

Evolution de la teneur en chlorure (prise d'eau du bec d'Ambes)
en fonction du débit de la Garonne à Tonneins





- La présence du bouchon vaseux, sur les parties amont du fleuve rendent problématiques les transferts d'eau douce mais chargé en sédiment. Deux actions sont potentiellement concernées :
 - La dérivation de Galgon sur l'Isle qui alimente en eau douce la centrale du Blayais et des périmètres d'irrigation. Ce pompage a été un temps pressenti pour sécuriser l'alimentation en eau potable. Sa remise en cause en période estivale, pourrait renvoyer des usages vers les nappes profondes (forage éocène du CNPE).
 - Un projet de production d'eau potable depuis les eaux de la Garonne en amont de Bordeaux. Ce **projet alternatif aux pompages en nappes éocène et oligocène, serait compliqué par une densité et une fréquence accrue du bouchon vaseux.**
- Les substitutions agricoles, qui s'appuient sur des transferts vers les nappes phréatiques où les cours d'eau. L'évolution à la hausse des besoins en eau des cultures (à surface égale) et à la baisse de la ressource superficielle en été impose de réfléchir sur des ressources sécurisées par les pluies hivernales (retenue, nappe du plioquaternaire).

7.2 - L'assainissement

Sur l'estuaire de la Gironde les enjeux de l'assainissement sont de plusieurs natures :

- Sur la C.U.B. la mise aux normes en cours du dispositif d'assainissement permet d'envisager à court terme une réduction sensible des flux de temps sec de matière organique qui sont rejetés dans la Garonne. Rappelons que les fonctions de dilution sont particulières en raison des volumes oscillants liés à

la marée et des débits de la Garonne. En l'absence d'usage baignade ou production d'eau potable, c'est surtout le risque de taux d'oxygène bas dans le bouchon vaseux qui doit être pris en compte. Les déversements en période de fortes précipitations constituent aussi des phases les plus sensibles. **La conjonction d'un positionnement du bouchon vaseux et d'un risque d'orage sur l'agglomération pourrait voir sa fréquence augmenter.**

- La gestion des inondations en temps de pluie exceptionnelle a toujours été une préoccupation majeure sur l'agglomération bordelaise sachant qu'en raison de la marée, l'évacuation des excès d'eau ne peut se faire par simple gravité. Le dispositif de prévention compte des bassins d'orage, une gestion fine du stockage dans le réseau d'assainissement et une batterie de pompes d'évacuation. **L'évolution du risque d'orage en fréquence mais surtout en intensité pourrait poser la question du bon dimensionnement de l'existant.**
- Sur les petits cours d'eau, la baisse des débits va poser la question des débits de dilution qui est déjà une question complexe pour beaucoup de petites collectivités et de nombreux chais. Les objectifs de rejet zéro en été, pourraient devenir une obligation sur de nombreux bassins versants.

7.3 - Aménagement rural et méconnaissance de l'évolution du risque de crue sur les petits bassins versants

L'aménagement des berges, des buses, des passages routiers occupe aujourd'hui une place importante dans la politique de gestion des bassins versants avec des enjeux économiques conséquents.

Comme pour le milieu urbain, la plupart des aménagements ruraux liés à la gestion des crues, ont été dimensionnés sur la base de critères d'analyses historique du risque de crue. **Il manque aujourd'hui des références exploitables** pour l'estimation prospective du risque de crue pour cette échelle de gestion de quelques dizaines de kilomètres carrés.

7.4 - La production nucléaire

7.4.1 - Les enjeux

Le CNPE du Blayais comporte quatre tranches à eau ordinaire sous pression (PWR), d'une puissance unitaire de 925 MW. Les mises en service industrielles ont été effectuées :

- le 1er décembre 1981 pour la tranche 1,
- le 1er février 1983 pour la tranche 2,
- le 14 novembre 1983 pour la tranche 3,
- le 1er octobre 1983 pour la tranche 4.

Le CNPE du Blayais assure plus de 5% de la production nationale d'électricité, un coefficient de disponibilité supérieur à 80%, et des productions annuelles pouvant atteindre plus de 25 TWh (milliards de KWh).

Chaque tranche a besoin, pour le refroidissement du condenseur, d'un débit d'eau moyen de 42 m³.s⁻¹, soit 168 m³.s⁻¹ pour 4 tranches en service. Cette eau est prélevée dans le chenal de Saintonge à environ 380 m de la rive, au niveau du pK 52 de la

Gironde large de 4,5 km. L'eau échauffée est rejetée en Gironde dans le chenal médian, situé entre les bancs de St Estèphe et de St Louis, à environ 2000 m de la rive.

L'Arrêté du 18 septembre 2003 autorisant Electricité de France à poursuivre les prélèvements l'eau et les rejets d'effluents liquides et gazeux pour l'exploitation du site nucléaire du Blayais, fixe le cadre réglementaire de la température maximum des rejets :

► La température des rejets en berge ne doit pas dépasser 30 °C.

Pour les rejets en berge, en dehors du cas visé au paragraphe I de l'article 16 (indisponibilité des bassins d'amenée), la différence de température des eaux rejetées par rapport à la température des eaux du milieu récepteur doit être inférieure ou égale à + 1 °C.

Les dispositions suivantes relatives à la température des rejets des eaux de refroidissement doivent être satisfaites sur le site :

► La température des eaux de refroidissement rejetées dans l'estuaire de la Gironde ne doit pas dépasser 30 °C, cette valeur est mesurée en permanence en aval des déversoirs D1 à D4, sur chaque puits d'échantillonnage CRF ;

► Cette température maximale est portée à 36,5 °C du 15 mai au 15 octobre ;

► Sur chaque réacteur, la différence (delta T) entre la température des eaux prélevées de la Gironde et la température des eaux de refroidissement rejetées ne doit pas dépasser 11 °C ;

► La température des eaux de la Gironde mesurée sur une période de 3 heures consécutives sur les deux thermographes amont et aval (n°s 2 et 5), à 50 m des ouvrages de rejet situés en milieu d'estuaire ne doit pas dépasser 30 °C.

Le dépassement du critère de température de 30 °C dans l'estuaire conduit l'exploitant à réduire la puissance thermique d'un ou de plusieurs réacteurs. Cette réduction de puissance doit être significative pour abaisser le plus rapidement possible, la température des eaux du milieu. Le retour à la puissance souhaitée ne peut être effectué qu'après constatation pendant au moins trois heures consécutives sur les deux thermographes, d'une température du milieu inférieure à 30 °C.

L'exploitation complète de la capacité de production de la centrale entraîne une augmentation de 10 à 11°C, soit environ 1°C pour 340 MW. En cas de dépassement des seuils réglementaires, la puissance doit donc être réduite d'environ 340 MW par degré excédentaire.

Pour l'exploitant de la centrale, le principal facteur limitant est la température du rejet. Les autres conditions sont influencées par des phénomènes complexes (marée)

à des pas de temps horaires qui ne nous sont pas accessibles dans le cadre de cette analyse.

7.4.2 - Evaluation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de production électrique de la centrale du Blayais.

La contrainte thermique se traduit par une adaptation de la production, pour éviter le dépassement des seuils réglementaires soit 30°C du 16 octobre au 14 mai et à 36,5°C du 15 mai au 15 octobre pour le rejet. Il a été considéré que les 4 tranches de 925 MW à pleine puissance génèrent une augmentation de 10°C de la température du rejet. Donc pour un fonctionnement à pleine puissance la température maximale de l'estuaire en amont de la prise d'eau ne doit pas dépasser :

- 30°C-10 °C = 20°C du 16 octobre au 14 mai,
- 36,5°C-10 °C = 26,5°C du 15 mai au 15 octobre.

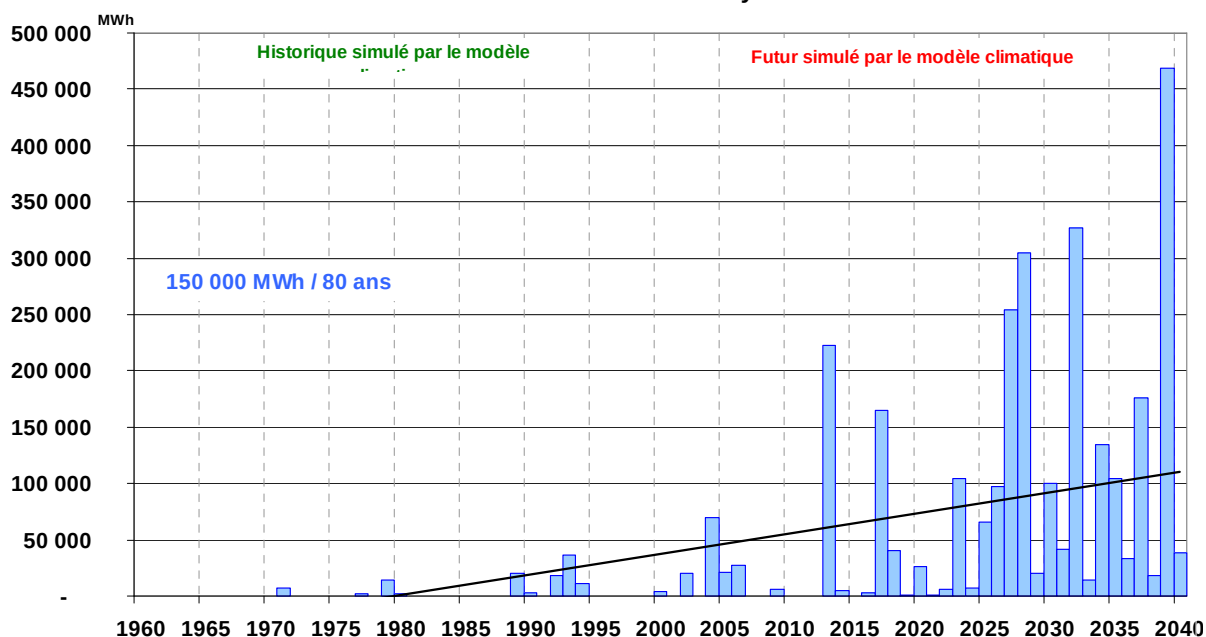
Pour chaque degré supérieur de la température de l'estuaire la puissance maximale doit être réduite d'environ de 370 MW (92,5 MW par tranche).

Les éléments retenus pour le calcul de la contrainte thermique du point de vue prospectif sont la température de l'eau au Pk 52 simulée au pas de temps horaire sur la période 1960 à 2040 à partir des données de température de l'air de la station fictive de Mérignac issue du modèle CERFACS. L'amplitude journalière des températures a été modélisée en considérant les variations médianes de la température par rapport à la moyenne. Cette simulation a été réalisée pour les quatre scénarii du modèle atmosphérique ARPEGE utilisés par le CERFACS.

La perte de production annuelle a ainsi été approchée. Les résultats présentés ici sont donc des ordres de grandeurs qui minimisent probablement les impacts sur la production. Les résultats pour les 4 scénarios climatiques utilisés sont les suivants.

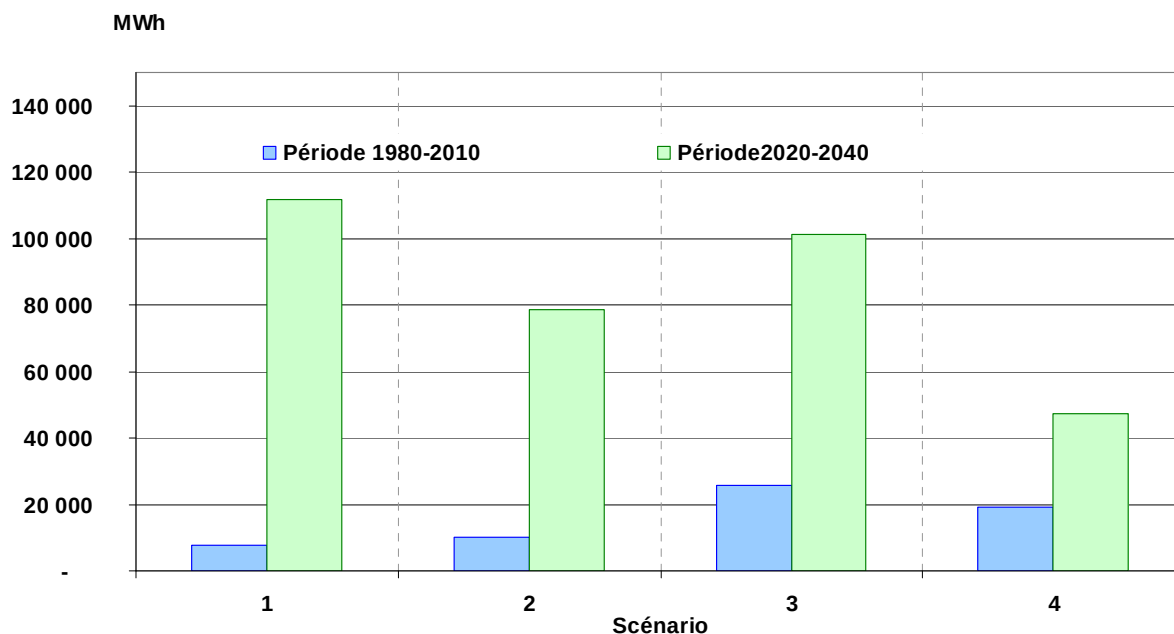
Scénario 1

**Perte potentielle de production due à la température de l'estuaire
à la centrale nucléaire du Blayais**



Remarque : le graphe précédent est théorique et analyse les conditions thermiques en supposant que la centrale existe depuis 1960 et se maintiendrait jusqu'en 2040.

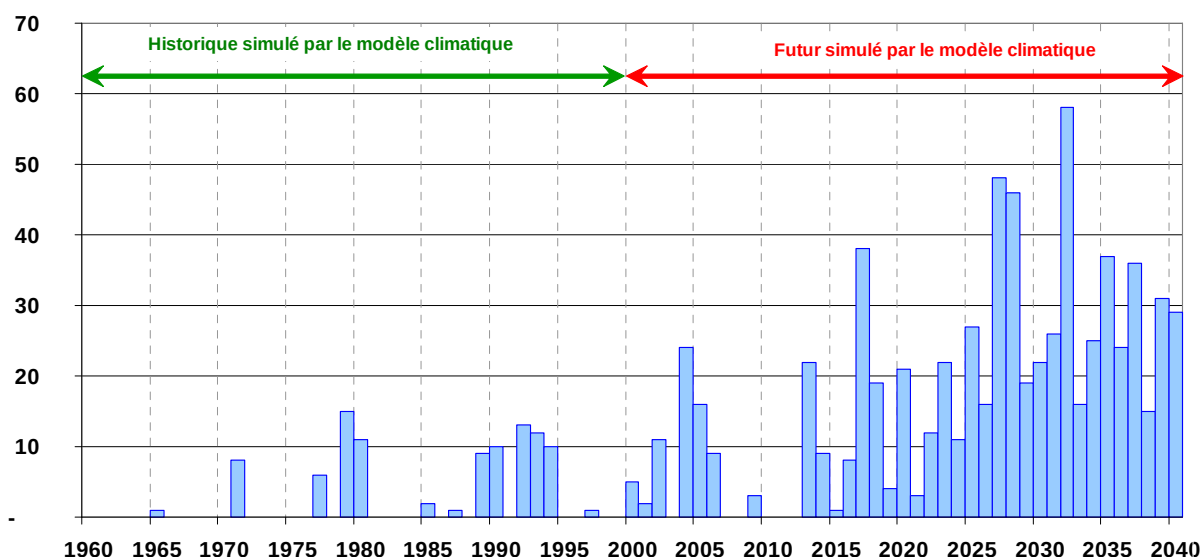
**Perte potentielle de production annuelle moyenne pour les quatre scénarii
pour les périodes 1980-2010 et 2020-2040**



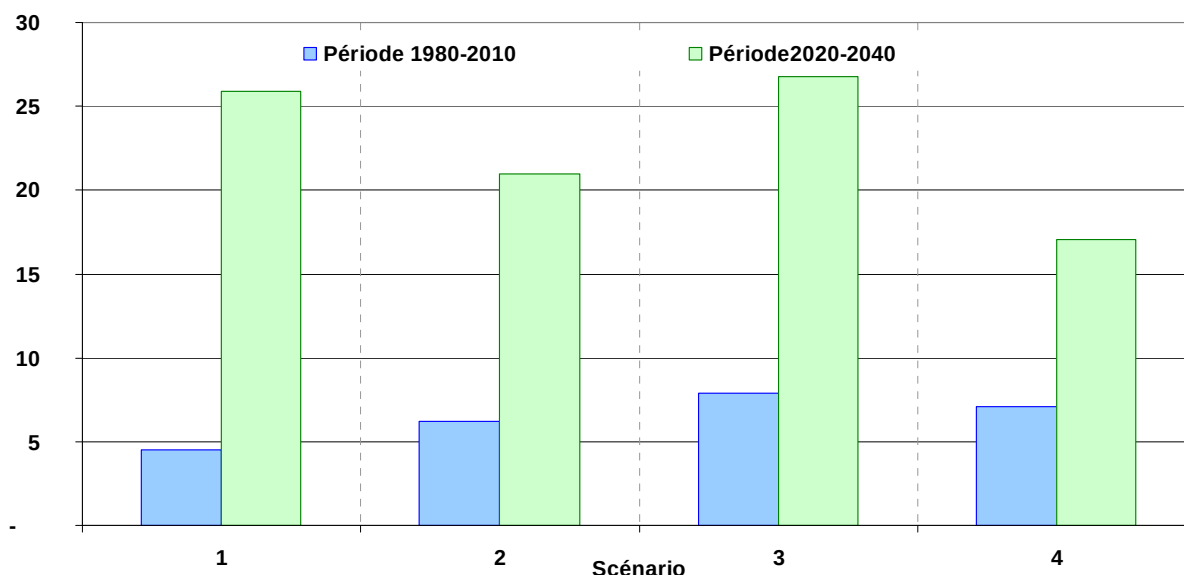
D'un point de vue quantitatif, la variabilité des scénarii climatiques entraîne des écarts assez importants des résultats. Toutefois, à l'horizon 2040, la production du CNPE du Blayais pourrait être diminuée d'environ 100 000 MWh par an. La différence de résultat entre les scénarii reste toutefois importante (différence maximum entre période 2020-2040 : 60 000 MWh).

Il est aussi intéressant d'évaluer la contrainte en termes d'indisponibilité que risque d'entraîner l'augmentation des températures. Les graphiques suivants présentent le nombre de jours par an où la production peut être potentiellement perturbée. Ce graphe doit surtout être pris comme un indicateur par défaut sachant que de nombreux épisodes de quelques heures de dépassement ne sont pas décrits.

Scénario 1 Nombre de jours où la température de l'estuaire limite la production



Nombre moyen de jours où la température de l'estuaire limite la production pour les quatre scénarii pour les périodes 1980-2010 et 2020-2040



Pour ce paramètre, les scénarii donnent des résultats qui présentent moins de variabilité. Il en ressort qu'à l'horizon 2040, il est probable que la production du CNPE du Blayais soit perturbée durant au moins 25 jours par an en plus qu'actuellement. Par ailleurs, les chroniques montrent le caractère quasi systématique de ces situations de hautes températures chaque été.

7.4.3 - Que représentent 100 000 MWh ?

Par rapport à la centrale du Blayais la perte de production potentielle apparaît modeste en regard de la production totale annuelle du Blayais mais cela représente la moitié de la production hydroélectrique réunie du département de la Dordogne.

Selon les termes de calcul retenus par l'observatoire régional de l'énergie en Aquitaine, cette production représenterait 8 600 Tep (tonnes équivalent pétrole).

7.5 - Disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation et restriction

La baisse pluviométrique estivale et surtout l'augmentation de l'ETP, vont renforcer la sollicitation des ressources en eau d'irrigation dans le périmètre.

Les arrêtés sécheresse sont pris par le Préfet sur la base des observations aux points de contrôle fixés dans les PGE et bénéficiant de valeur de DOE/DOC. Ce réseau couvre la très grande majorité des prélèvements agricoles en eau superficielle du bassin Garonne et Dordogne. Le respect des objectifs fixés dans le PGE est un objectif confirmé par le SDAGE. Ce respect s'appuie sur une maîtrise de l'évolution des prélèvements plafonnés par un moratoire. L'évolution de la réglementation conforte cette logique d'adéquation entre ressource disponible et autorisation de prélèvement. **C'est à ce niveau (c'est-à-dire avant 2011) que l'évolution des ressources hydriques doit être intégrées sur chaque sous bassin en zone de répartition des eaux.**

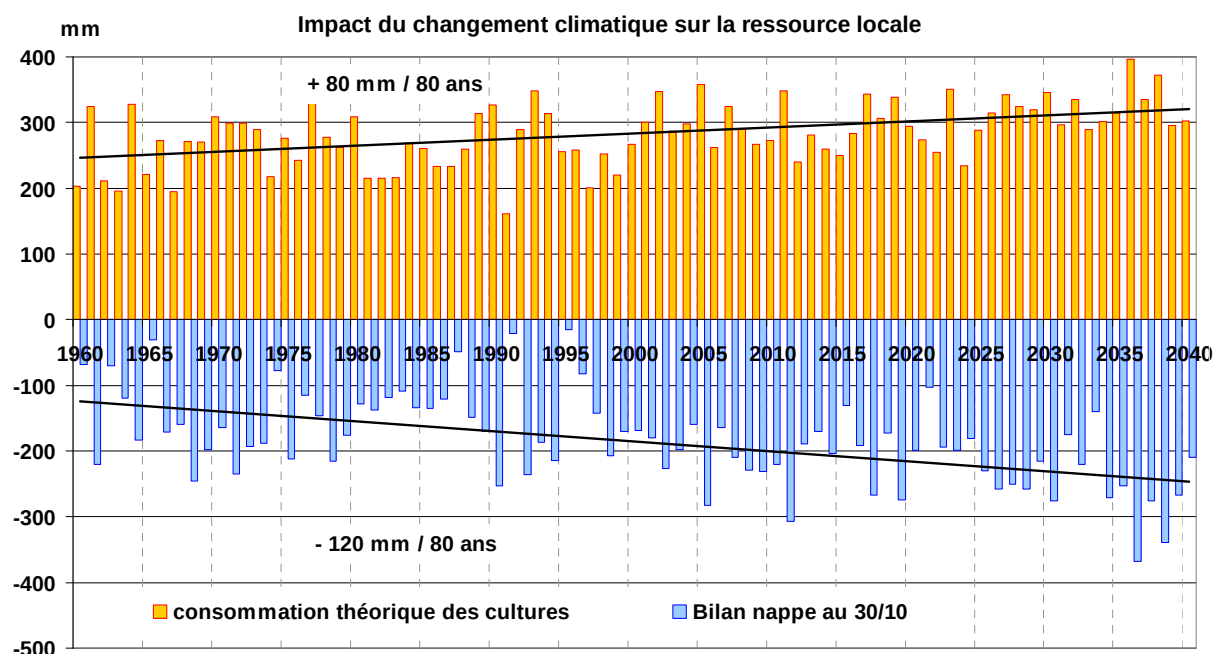
Sur les petits cours d'eau hors PGE et donc sur l'essentiel des cours d'eau côtiers de l'estuaire, c'est le ROCA suivi par l'Onema qui déclenche après réunion de concertation, les prises d'arrêtés. Parfois ces arrêtés n'ont pas de conséquence sur l'agriculture faute d'usager préleveur. En effet, les prélèvements directs en cours d'eau sont assez peu développés, la ressource étant d'ores et déjà peu fiable.

L'historique des arrêtés de restriction est en cours d'élaboration sachant cependant que le formalisme de ces arrêtés, s'est considérablement renforcé ces dernières années. La DIREN de bassin, collecte d'ailleurs l'intégralité de ces arrêtés.

L'aggravation des étiages sur les petits cours d'eau va continuer à renforcer deux comportements soit l'abandon d'une irrigation qui ne représente qu'une fausse sécurité, soit la constitution de ressource par stockage rempli en hiver. Dans ce cas, **la principale préoccupation devrait être l'impact cumulatif potentiel sur le régime des eaux automnales et hivernales.**

Vis-à-vis des nappes du plioquaternaire elles présentent une inertie saisonnière forte. L'alternative à l'irrigation est le pin. Or le bilan hydrique de la forêt = pin + sous bois serait du même ordre de grandeur que celui d'un maïs. C'est plus vers les pratiques culturales et en particulier la gestion du drainage qu'il convient de se tourner, si l'on souhaite initier une gestion de ces nappes superficielles.

L'illustration ci-dessous présente l'évolution attendue de la demande climatique des cultures au niveau local, et les conséquences induites sur le bilan de la nappe phréatique sous jacente sollicitée pour l'irrigation sur la période juin à octobre. On constate que la baisse de la pluviométrie estivale et l'augmentation de la pression de prélèvement à l'hectare se traduisent par un déficit qui s'aggrave. Les conséquences de cette tendance doivent être relativisées compte tenu de la surface concernée par l'irrigation, encore minoritaire par rapport aux zones forestières qui pèseront plus sur un déficit de recharge printanière contrairement aux zones de culture (sol nu en hiver). Rappelons enfin que les parcelles de grandes cultures jouent un rôle déterminant dans la gestion antifeu du massif Landais.



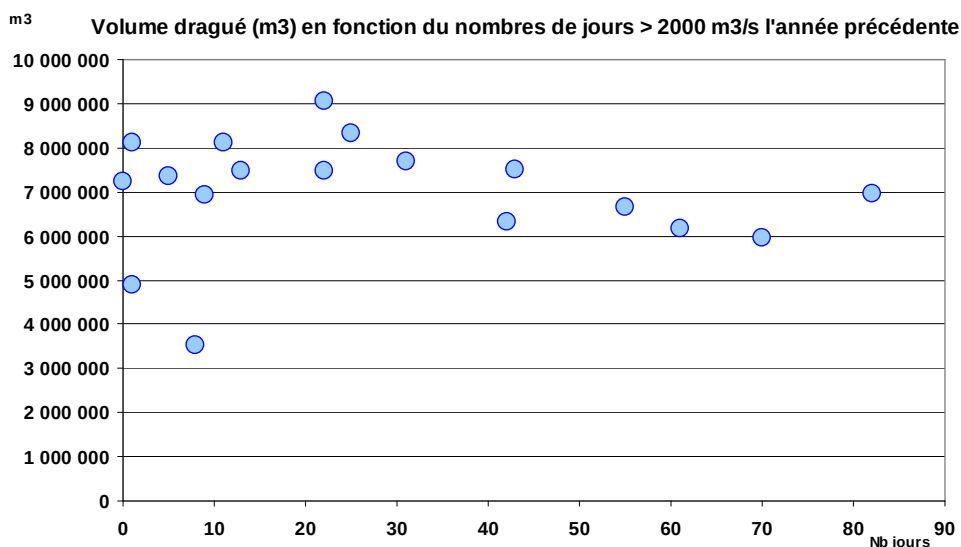
7.6 - Conséquences sur la fréquence et la localisation des dragages d'entretien

L'historique des opérations de dragage est un indicateur important du comportement sédimentaire de l'estuaire intéressant à suivre au même titre que l'évolution globale de la bathymétrie. Le coût annuel de l'entretien est d'environ 12 millions d'euros et détermine le bon fonctionnement de la navigation dont dépendent de nombreuses industries (Airbus notamment). L'enjeu est donc considérable. Les relevés des actions en volume et par secteur sont bien connus sur la période 1990 à 2007. Il convient cependant de déduire les opérations exceptionnelles d'approfondissement du chenal. Le volume dragué est relativement constant, depuis les années 1993. Les volumes dragués par pk sont présentés dans le graphique suivant entre 1990 et 2007.

Il n'apparaît pas encore de tendance nette de l'augmentation des opérations de dragage dans la Garonne sur un secteur considéré comme sensible aux effets du stationnement prolongé du bouchon vaseux, entre les pk0 et 30 entre 1990 et 2007. Ce constat contraire aux résultats envisagés *a priori* sur ce secteur est en cours d'expertise avec le PAB.



Le graphique suivant présente la relation entre le volume dragué l'année n et le nombre de jours où les débits Garonne + Dordogne sont supérieurs à 2000 m³/s. On observe une légère tendance de réduction du volume dragué en fonction du nombre de jours supérieurs à 2000 m³/s, seuil estimé d'expulsion d'une partie du bouchon vaseux (non prise en compte ici du coefficient de marée). Les années 1991 et 1992 se comportent comme des années atypiques.



8 - LES PARAMETRES DE L'ECOSYSTEME

8.1 - La biodiversité estuarienne

L'écosystème est comme le climat le siège de mécanisme de rétroaction d'une très grande complexité. Un principe peut cependant être admis, c'est que si un papillon change le temps, le climat aura aussi des répercussions sur les papillons.

Il paraît excessivement risqué de croiser les incertitudes sur le climat du futur avec les déséquilibres et les ajustements qui seront induits sur les écosystèmes. Les analyses se fondent en général sur le principe que les communautés vivantes sont adaptées à leur milieu. En déséquilibrant ces systèmes par un changement lourd (en particulier la température pour le milieu aquatique) et rapide, les changements climatiques pourraient être à l'origine de crise pour les communautés présentes.

Les facteurs d'évolution de la biodiversité à des échelles de temps réduites sont étroitement associés à l'évolution du milieu naturel d'une part et aux mécanismes de colonisation de ces milieux par des organismes adaptés d'autre part.

Les équilibres trophiques de l'estuaire pourraient être sensibles à des évolutions thermiques (cf. thèse trophique du Cemagref).

L'estuaire est un milieu partiellement ouvert à des influences océaniques mais le milieu aquatique continental est assez hermétique aux échanges de populations par des mécanismes naturels. La faiblesse relative de la biodiversité piscicole française en témoigne. Cependant, les facteurs humains pourraient jouer un rôle important dans les transferts d'espèce volontaires ou non. De nombreuses espèces allochtones dont certaines sont dites invasives telles que l'écrevisse de Louisiane ou la Jussie constituent probablement des éléments constitutifs du futur écosystème. La question d'une action d'introduction volontaire est parfois évoquée mais elle est aujourd'hui interdite, les risques pour la biodiversité étant jugés très supérieurs à d'hypothétiques bénéfices.

8.2 - Faune aquatique

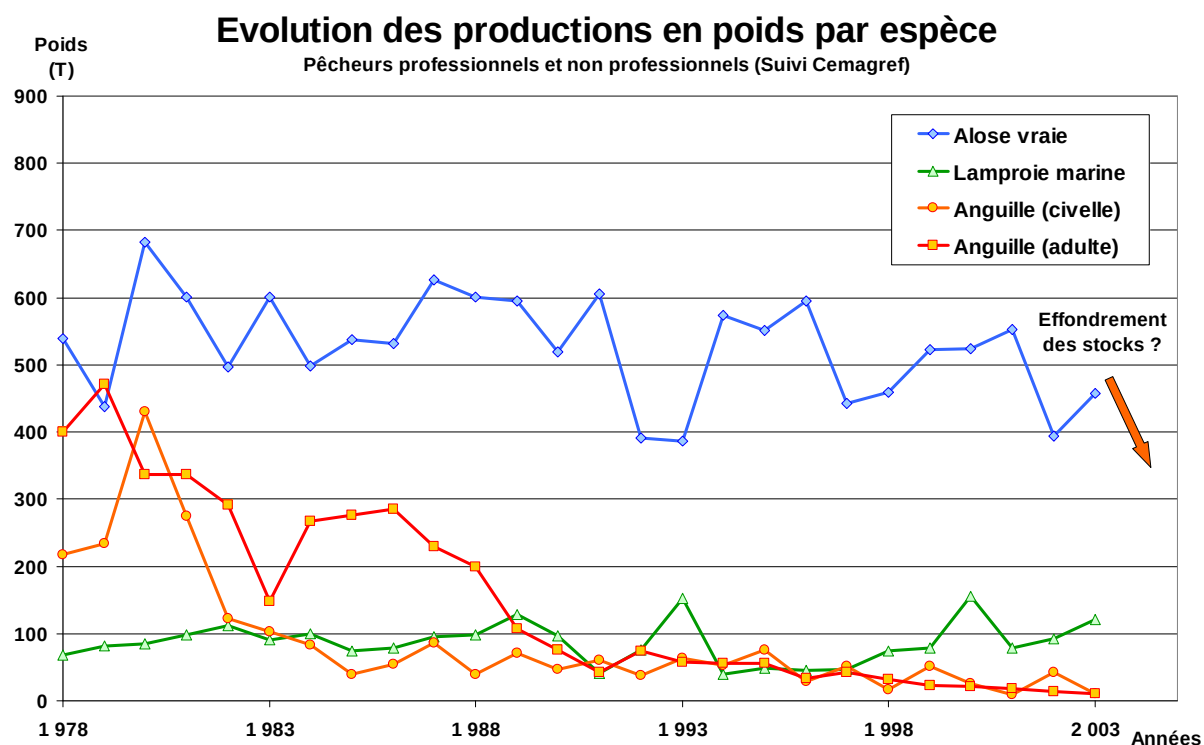
L'estuaire de la Gironde est l'un des plus diversifiés de France sur le plan de la fréquentation par les migrateurs amphihalins.

Les conditions d'évolution sur le long terme dépendent de multiples facteurs :

- Qualité des milieux (eaux, sédiments, habitats) ;
- Pression de pêche ;
- Connectivité de l'estuaire avec le réseau hydrographique du bassin versant.

Ces facteurs sont tous influencés par l'activité humaine en tant que pression ou facteur de correction. Ainsi les obstacles physiques aux migrations piscicoles ont connu après une phase de multiplication associée au développement de l'hydroélectricité, une phase d'atténuation grâce à la construction de nombreux ouvrages de franchissement. Dans les zones de marais, la modernisation des portes à flot s'est plutôt traduite par une aggravation des difficultés et une réduction de la connectivité des petits bassins versant avec l'estuaire.

Aujourd'hui le constat effectué sur les poissons, maillon supérieur de la chaîne alimentaire est préoccupant. Le graphique ci-dessous présente les productions pêchées de quelques espèces phare de l'estuaire. Cette production peut être considérée comme un indicateur indirect de l'abondance piscicole. Le point d'interrogation est aujourd'hui (en 2008) confirmé par toutes les observations. L'actualisation de cet indicateur est aujourd'hui largement soumise à la bonne volonté des professionnels, exercice difficile en période de tension sur la ressource halieutique.



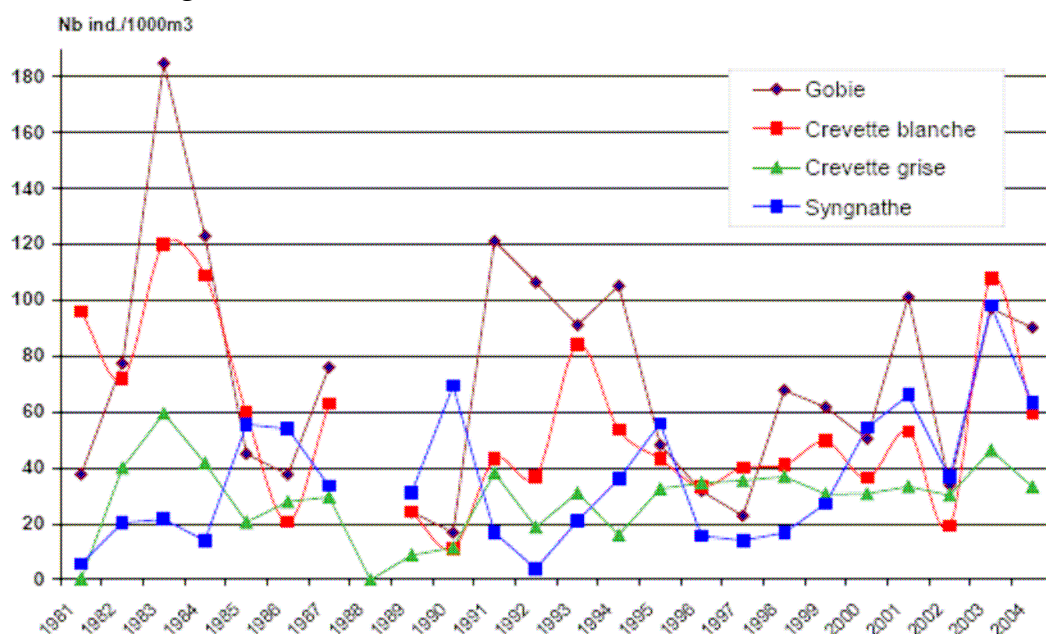
Les paramètres « anthropiques » du bassin versant ne sont cependant pas le seul facteur d'explication de la présence ou on d'une espèce ainsi que de son abondance. Le cas de l'éperlan abondant il y a quelques décennies, ne trouve plus en Gironde, les conditions d'accomplissement de son cycle biologique. Il a disparu sous l'effet du réchauffement.

Certaines espèces moins directement soumises à la pression de pêche sont suivies depuis les années 1980 par le Cemagref. Le suivi de ces espèces représente un indicateur des évolutions de l'écosystème estuarien.

On n'observe pas de tendance nette de l'abondance des **crevettes blanches**, qui se caractérise par des variations cycliques importantes. La période de reproduction tend à s'accroître depuis les années 1980, probablement en raison du réchauffement progressif des eaux. Cette espèce qui fait l'objet d'une pêche dirigée doit continuer à être suivie attentivement.

Il est important de souligner l'existence de malformations prononcées de l'exosquelette de nombreux spécimens de crevette, apparues au moins dès 1992 et qui tendent à s'intensifier. Elles traduisent vraisemblablement de graves perturbations de l'environnement de ces espèces, d'origine encore indéterminée.

On constate également des abondances de **syngnathes** en forte progression depuis 1998. Les variations d'abondance de cette espèce semblent à mettre en relation avec les variations des conditions environnementales à l'intérieur de l'estuaire. Il s'agirait d'un élargissement des périodes d'incursion en lien avec la prolongation de la période d'étiage.



Le Cemagref a appliqué aux poissons migrateurs, une analyse équivalente à celle des forestiers en identifiant sur la base de quelques critères simples les facteurs « lourd » de l'écosystème pouvant expliquer la distribution des espèces piscicoles. La température est le principal facteur dépendant du climat. Les grands migrateurs, tels que le saumon, les truites de mer ou les aloses présentent des réponses spécifiques aux changements thermiques. En particulier, la modification du régime de fonte des neiges dans les Pyrénées pourrait avoir des répercussions très fortes sur le cycle dulçaquicole des salmonidés. Paradoxalement, les grands aménagements hydroélectriques et leur effet thermique tampon ([jusqu'à 4°C en moins pour la température mensuelle la plus chaude sur la Dordogne à Argentat_ source Etude des impacts des éclusées sur la Dordogne Ecogéa/Eaucéa](#)) peuvent amortir un temps ces futurs décalages typologiques.

La compréhension des règles de fonctionnement de l'écosystème estuarien est d'une grande complexité. Il s'agit d'un thème de recherche majeur qui détermine non seulement les tendances lourdes des systèmes mais dont on attend aussi des pistes d'adaptation. Les mesures de réduction de tous les handicaps autres que climatique

sont une voie explorée dans le SAGE estuaire et plus généralement dans toutes les politiques concernant les poissons migrateurs.

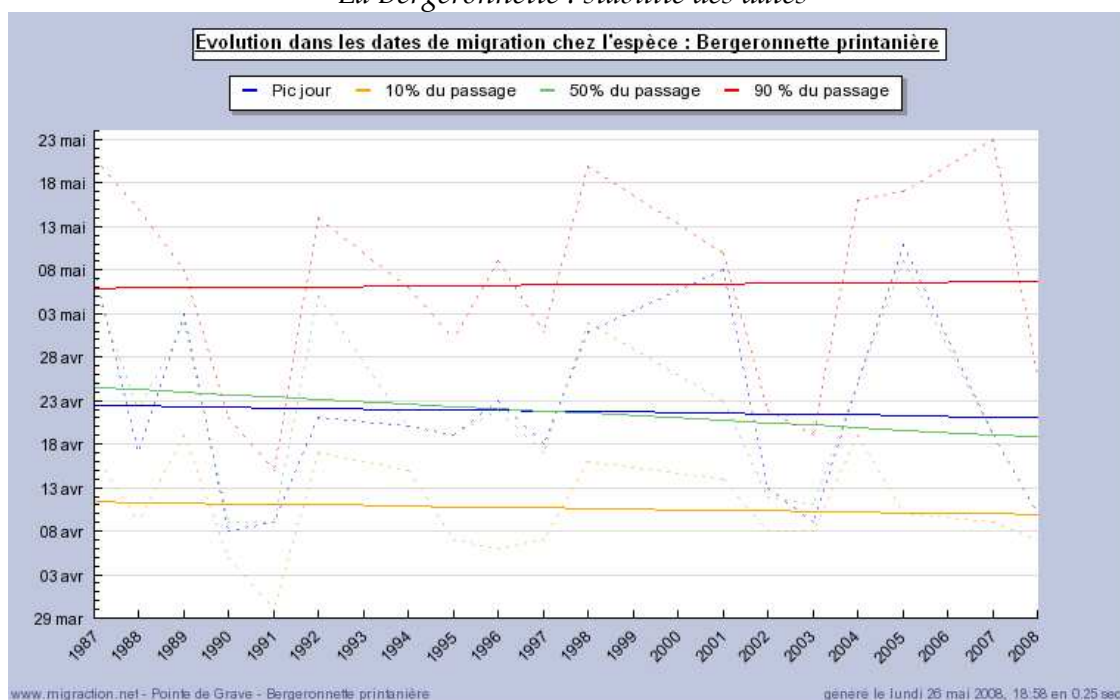
Il est important de confirmer la pertinence de cette approche pour le moyen terme en rappelant notamment que la gestion des milieux naturels passe d'abord par une approche intégrée de l'habitat aquatique (diversité, connectivité, qualité physico chimique de l'eau et des sédiments) dont les principes de base sont a priori valables quelque soit le cortège d'espèce présente.

8.2.1 - Faune aviaire

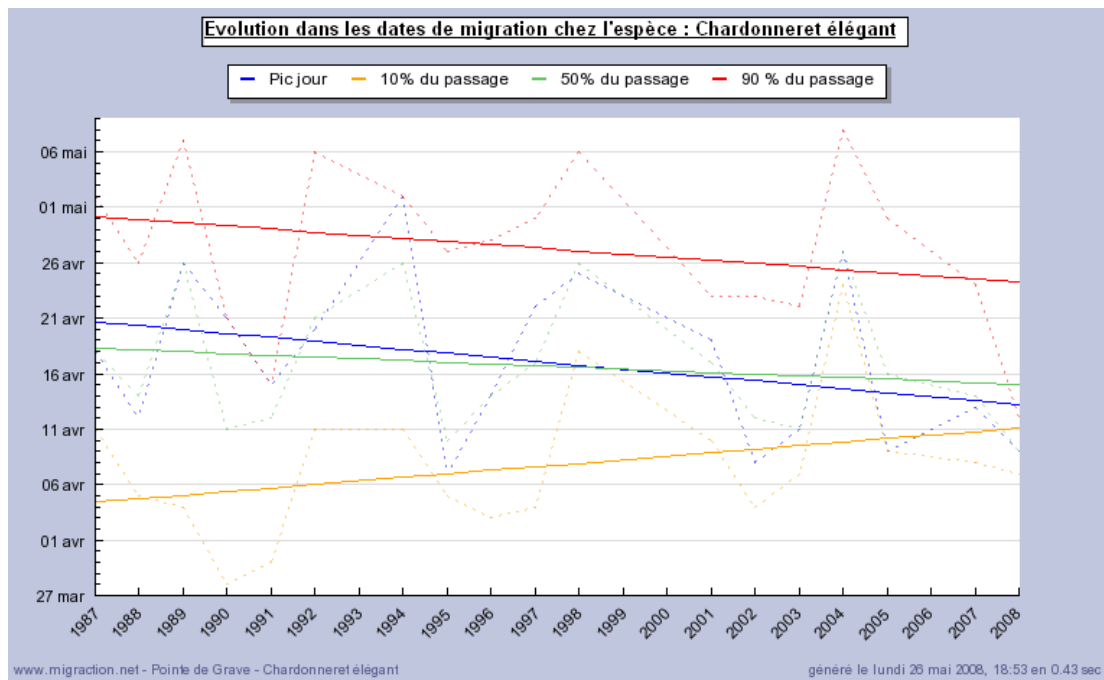
Le sujet de l'impact des changements climatiques sur les migrations aviaires intéresse de nombreuses structures de recherche (ONCFS CNERA Avifaune Migratrice notamment), mais elles nécessiteront des observations sur le long terme. Des travaux sont en cours sur l'estuaire de la Seine avec une [étude sur l'impact du changement climatique sur les oiseaux migrateurs, nicheurs sédentaires, aires de répartition des espèces sur l'estuaire de la Seine : Franck Morel](#).

Pour l'estuaire de la Gironde le site d'observation du Verdon constitue un référentiel précieux grâce à un historique d'observation des dates de migration déjà conséquent. Les exemples ci après illustre la grande diversité des situations :

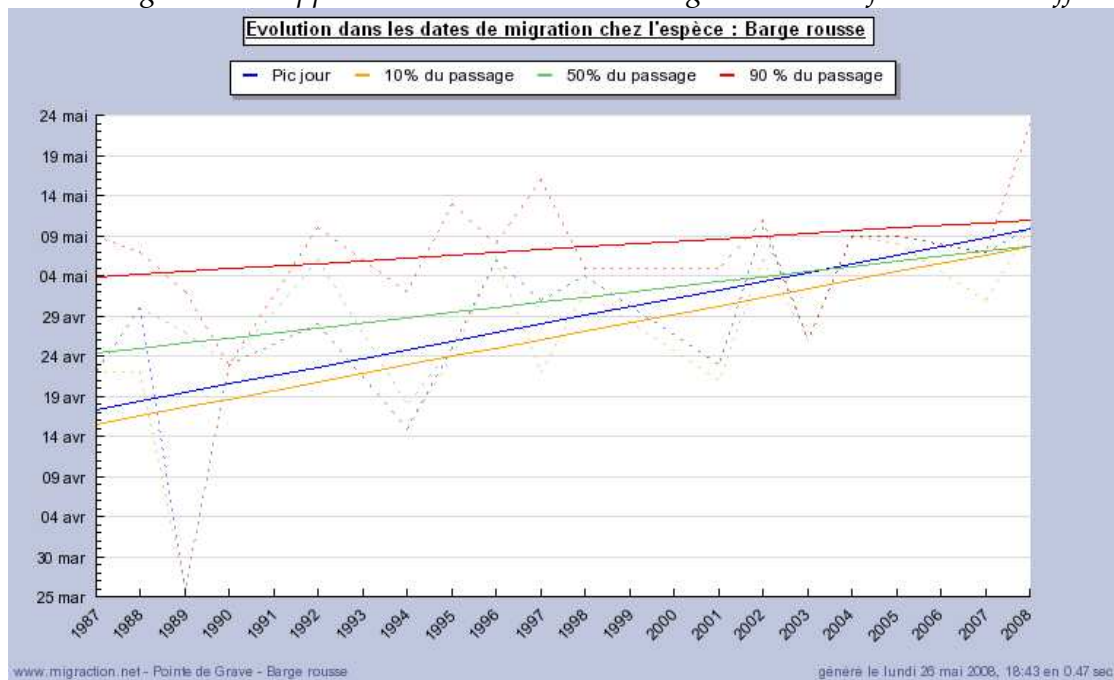
La Bergeronnette : stabilité des dates

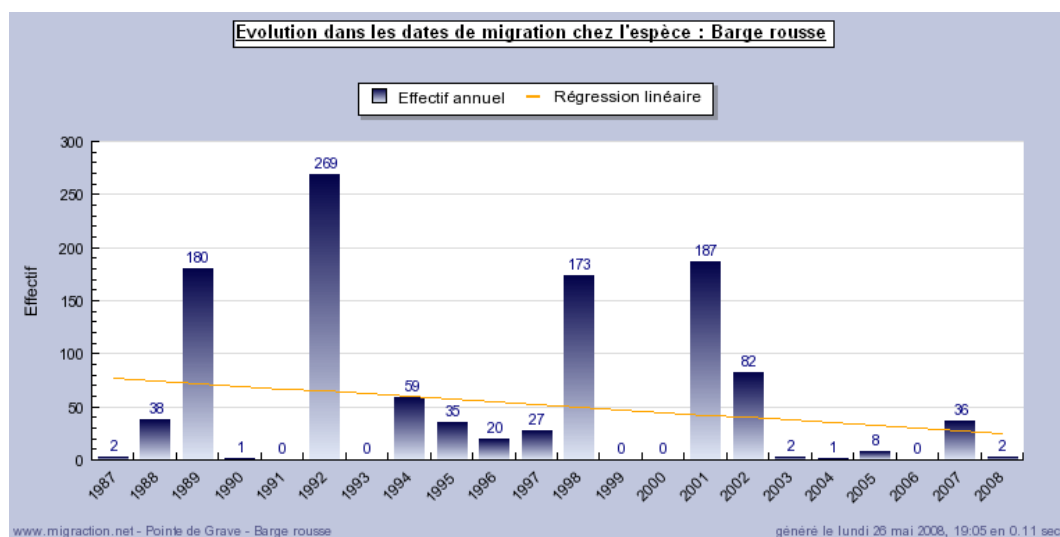


Le chardonneret : précocité des migrations



Barge rousse : apparence de retard dans les migrations mais forte baisse d'effectif





Du point de vue de la LPO, il est encore trop tôt pour évaluer l'impact du réchauffement climatique sur les oiseaux migrateurs. La situation est contrastée puisque pour certaines espèces les périodes migratoires sont très prévisibles, par exemple : les barges à queues noires, écart-type de seulement 9 jours pour 47 années de suivi en Maine-et-Loire, idem pour la sterne pierregarin, 6 jours pour Martinet noir, Hypolaïs polyglotte, ... Un décalage net des dates de migration serait un signe tangible d'un bouleversement.

En revanche, beaucoup d'espèces sont caractérisées par la grande variabilité interannuelle des dates de migration sous l'influence probable des conditions météorologiques locales au niveau des haltes migratoires en lien avec le vent.

Les premiers constats sont cependant faits quant à l'impact du changement climatique sur les effectifs de population, les aires de nidification et les dates de migration pré et post-nuptial avec des risques spécifiques pour certaines espèces (exemple de la divergence entre la date d'arrivée des gobe-mouches estivants et l'émergence des diptères qui conduit à une baisse du succès reproducteur). Il y aurait 3 causes probables à l'avancement des migrations printanières (A. Hedenström, 2007) :

- Un départ précoce de la zone de d'hivernage ;
- Un changement de dynamique de comportement spatial, par exemple, des itinéraires de migration plus courts ;
- Un départ de migration inchangé, mais une vitesse accrue de migration ou sans étape.

Les conclusions de l'étude sur la vitesse de migration en relation avec le changement climatique, sont que le modèle prédictif sur la vitesse de migration en fonction de variables environnementales permet aujourd'hui de tester des hypothèses (températures, ressources trophiques, nombre d'étape dans la migration, vitesse de vol, consommation d'énergie, capacité de stockage énergétique, comportement, physiologie, génétique...) pour expliquer les observations actuelles de perturbations dans le cycle migratoire. L'évolution adaptative du cycle biologique de ces espèces en réponse aux changements climatiques se fera de manière plus ou moins rapide en fonction des espèces. Des études montrent déjà que des espèces dont l'adaptabilité est faible ou trop lente sont associées à un déclin de la population (Both et al. 2005).

9 - LES CONSEQUENCES SUR LES USAGES EN LIEN AVEC L'ÉVOLUTION DE L'ÉCOSYSTÈME

9.1 - Sanitaire

Le principal enjeu perçu dans le territoire Girondin est le risque lié à une prolifération des moustiques. Rappelons que le territoire était autrefois impaludé.

Le développement des moustiques est directement lié à la gestion des niveaux d'eau dans les marais (succession de phases en eau et d'assecs).

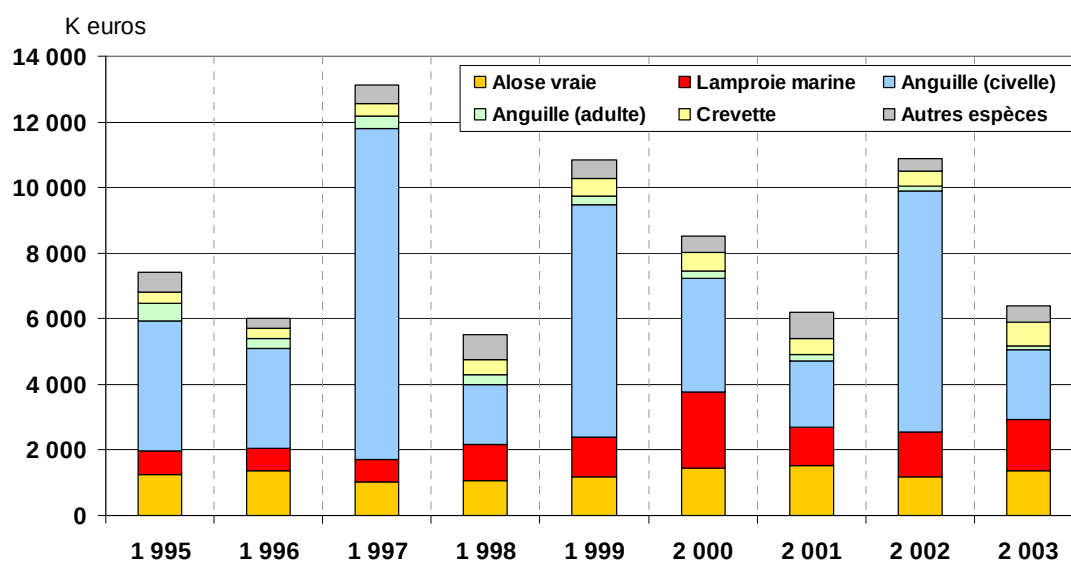
Les stratégies de prévention de lutte anti moustique devraient cependant permettre un accompagnement des évolutions hydriques et thermiques.

9.2 - La pêche

L'évolution des espèces piscicoles ne devrait pas générer de modification sensible sur la pratique de la pêche amateur en rivière. Les tendances constatées de désaffection progressive de ce loisir tiennent à de nombreux facteurs plus sociologiques que climatique.

Vis-à-vis de la pêche estuarienne professionnelle la question est beaucoup plus complexe. La réduction régulière du nombre de pêcheurs ne peut être simplement imputée à des déséquilibres d'origine climatique, mais plus à des enjeux économiques liés à une raréfaction de la ressource, elle-même en lien étroit avec la pression de pêche mais également avec une modification des milieux. Il est cependant difficile de discriminer dans cette évolution la part strictement climatique (essentiellement le régime hydrologique et le régime thermique) de la part due aux pollutions sur le bassin versant et sur l'estuaire. Le cas de la contamination des anguilles par les PCB est un exemple significatif de ce type de problème. Les pêcheries de sole pourraient être impactées par la pollution des sédiments. L'aloise est sans doute concernée par l'effort de pêche trop fort et par des contraintes spécifiques à ses phases de reproduction estivale (température, bouchon vaseux ?).

évolution et répartition du chiffre d'affaire de la pêche estuarienne de 1995 à 2003



9.3 - La chasse

La chasse sur l'estuaire est une activité très liée aux migrations aviaires. Le calendrier officiel d'ouverture de la chasse respecte les cycles écologiques de reproduction et de passage. Toute modification dans le calendrier écologique peut se traduire soit par une saison de chasse sans gibier (déjà parti) ou très perturbant pour l'espèce.

Selon les chasseurs, le calendrier est déjà complexe et toute modification ajustant ce calendrier au cas par cas se traduira par une désaffection de la pratique qui sera jugée trop contraignante. Le risque semble donc trop faible pour engager une anticipation de ces phénomènes. L'adaptation des pratiques accompagnera les constats écologiques.

Oiseaux de Passage	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Phasianidés												
Caille des blés.....	Ecologie	Femelle pour nidification arrivée des mâles arrivée des jeunes de l'année pour reproduction										
	Chassabilité		20 février 2008					25 Août 2007				
Columbidés												
Pigeon biset.....	Ecologie	Reproduction généralement sédentaire en France										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Pigeon colombin.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Pigeon ramier.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Tourterelle des bois.....	Ecologie		20 février 2008		Ampr*	Reproduction		migration vers l'Afrique				
	Chassabilité		20 février 2008					25 Août 2007				
Tourterelle turque.....	Ecologie	Reproduction généralement sédentaire en France										
	Chassabilité		20 février 2008						9 septembre 2007			
Limicoles												
Bécasse des bois.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		20 février 2008						9 septembre 2007			
Alaudidés												
Alouette des champs.....	Ecologie	Dmpre* généralement sédentaire en France										
	Chassabilité		31 janvier 2008						9 septembre 2007			
Turdidés												
Grive draine.....	Ecologie	Ampr*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Grive litorne.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Grive mauvis.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Grive musicienne.....	Ecologie	Dmpre*										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			
Merle noir.....	Ecologie	Dmp Reproduction										
	Chassabilité		10 février 2008						9 septembre 2007			

Dmpre/post*: Départ de migration pré-nuptiale/post-nuptiale Ampr/post*: Arrivée de migration pré-nuptiale/post-nuptiale

chasse ouverte

oiseau sur le territoire Français

10 - L'ORGANISATION DES ACTEURS

10.1 - Les collectivités locales

Les collectivités locales sont aujourd'hui les structures en charge de l'aménagement du territoire. Les décisions dans le domaine de l'urbanisme doivent être éclairées à de très nombreux niveaux en lien avec les risques de changement climatiques :

- Gestion du risque d'inondation (gestion des digues et de l'occupation du sol en zone inondable) ;
- Gestion du risque pluvial et dimensionnement des ouvrages ;
- Gestion du risque d'incendie en forêt et urbanisme ;
- Gestion de l'eau potable et juste appréciation de la fiabilité à long terme des ressources mobilisées ;
- Gestion de l'assainissement et dimensionnement pertinent des infrastructures.

Au niveau de la recherche, les collectivités ont des moyens d'orientation notamment sur des recherches appliquées à des questions locales. Aujourd'hui la Région joue un rôle déterminant dans le financement des projets de recherche autour de la thématique environnement (incluant « changement globaux »). La Région Aquitaine organise chaque année des appels à projet autour de 5 thématiques dont 2 au moins recouvrent potentiellement les préoccupations estuariennes : « Développement durable, eau, vigne, forêt » et « Sciences humaines ».

Au niveau de la diffusion des informations elles sont un relais puissant auprès des citoyens. Les messages transmis sur les enjeux des changements globaux vont jouer un rôle important pour la crédibilité des adaptations qui seront engagées.

Enfin citons l'importance des politiques de prévention qui touche notamment au domaine des transports, de l'urbanisme et de la production d'énergie (exemple du Plan Climat de la Région Aquitaine).

10.2 - Organisation des acteurs à l'échelle du district : le SDAGE Adour Garonne

Le SDAGE Adour Garonne constitue le cadre de référence nécessaire pour relayer les préoccupations de chacun des territoires du bassin. Vis-à-vis de l'estuaire les trois grandes responsabilités concernent :

- La gestion de la continuité écologique qui détermine largement la capacité de résistance des populations de migrateurs ;
- La maîtrise des pollutions dont une part se révèle dans le contexte estuarien ;
- La maîtrise des débits arrivant à l'estuaire puisque les étiages et sans doute les crues fréquentes seront fortement modifiées par les changements globaux. En confortant le réseau des points nodaux, cette politique permet de partager

la responsabilité des efforts en matière de maîtrise des impacts des prélèvements notamment d'irrigation ou de la gestion des grands réservoirs hydroélectriques.

10.3 - Organisation des acteurs locaux : le Sage estuaire outil fédérateur

Le SAGE estuaire est une opportunité pour organiser les acteurs du territoire à différents niveaux :

- Servir de caisse de résonances et de structure de conciliation aux préoccupations des différents acteurs locaux ;
- Traduire en règles opposables les décisions les plus nécessaires dont celles permettant le respect de la DCE. Dimensionnement des rejets admissibles, des volumes prélevable, des aménagements de compensation, des restrictions d'usages (quota, interdiction temporaire ou permanente, ...) ;
- Planifier les investissements dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et des usages qui en dépendent. En particulier l'organisation des acteurs pour une prévention des risques plus efficace est un volet important du SAGE ;
- Mobiliser les savoirs existants, orienter l'action de recherche et permettre leur diffusion.

10.4 - Rôle et diffusion des travaux de prospective climatique

Les travaux de recherche dans le domaine de la prospective climatique doivent sortir des laboratoires pour entrer dans le champ de l'aide à la décision publique. Ce rapport montre que les incertitudes dans ce domaine, rendent ce passage difficile.

Les gestionnaires de l'environnement sont habitués à la notion de risque et d'incertitude. Les éléments qui permettent d'établir des tendances et qui fixent des ordres de grandeurs sont très attendus. L'horizon à moyen terme (quelques dizaines d'années est bien celui qui détermine l'essentiel de l'action publique : autorisation de prélèvement, de rejet). Les actions à plus long terme (urbanisme, gestion forestière, infrastructures lourdes) sont confrontées à des incertitudes manifestement plus lourdes en raison des domaines concernés : niveau de l'océan, tempêtes, évolution sanitaire, transformation des paysages.

Le distinguo entre le très probable et le très incertain peut devenir un élément de décision important pour les politiques publiques qui sont confrontées au traitement médiatique de l'information qui a du mal à relativiser l'importance des phénomènes et leur propre rythme.

10.5 - Les structures de recherche sur les impacts des changements globaux

L'estuaire de la Gironde bénéficie d'un environnement scientifique très important. Le principal défi pour les structures de recherche est de gagner en lisibilité sur le niveau des savoirs déjà acquis et des programmes de recherche.

Les attentes concernent donc :

- Au-delà de SOMLIT, l'accessibilité et la valorisation de l'information disponible pose un vrai problème de lisibilité de l'activité scientifique autour des mots clef : Estuaire de la Gironde et changement climatique. Le partage opérationnel de l'information reste un enjeu majeur pour les structures de recherche en Aquitaine, avec de grands progrès réalisés (programmes du GIS Ecobag, BDD Domino (UMR EPOC), Réseau de recherche Littoral) mais aussi une certaine fragilité de ce processus assez largement dépendante du « volontariat ».

Sur le seul sujet estuarien, **l'organisation d'une plateforme de partage systématique des savoirs dans l'ensemble des disciplines, nécessiterait (probablement au moins) une année pleine de travail !** Ce constat peut être analysé de deux manières complémentaires :

1. l'information scientifique existante est extrêmement riche (ce qui est un atout)
 2. mais l'absence de synthèse entretenue porte le risque de doubler sur certains thèmes cet effort de recherche, rend très difficile pour les non scientifiques un point de vue global sur les savoirs existants et les déficits de connaissance et limite l'efficacité d'une stratégie sur le moyen-long terme.
- Une meilleure compréhension des liens fonctionnels entre les différents paramètres de l'environnement. Au niveau de l'estuaire deux grands enjeux sont dégagés :
 - o le fonctionnement hydrologique incluant la dimension sol et sous sols. Le contexte hydrogéologique a des impacts majeurs sur l'organisation des paysages (forêts, zone de marais) et des usages (irrigations, eau potable). Il n'est pas encore bien maîtrisé.
 - o Le fonctionnement écologique de l'estuaire. Les liens entre les différents compartiments de cet écosystème de transition sont la clef de la pertinence des décisions administratives dans le domaine de la gestion des habitats naturels (exemple gestion du chenal de navigation, aménagement des marais).
 - Les scientifiques ont un rôle de sentinelle sur les risques actuels et à venir. Ceci suppose la construction de référentiel bancarisé sur plusieurs années ce qui est effectivement une condition minimale pour décrire des évolutions tendancielle qui peuvent paraître masquées par les fluctuations saisonnières ou annuelles (ce qui est l'un des objectifs déjà l'objectif poursuivi par Somlit). Cette fonction suppose aussi la constitution d'outils de veille pour repérer des évolutions ayant des conséquences potentielles importantes. En particulier des pollutions spéciales (métalliques, médicamenteuses, etc..) peuvent avoir des

répercussions très lourdes sur la dynamique des populations et peuvent être modifiées en permanence par le progrès technique.

- Les modèles d'impacts sont la traduction opérationnelle des savoirs fondamentaux. Les conséquences sur la gestion des territoires et des usages peuvent être déterminantes. Ainsi l'évolution du régime thermique ou de la salinité estuarienne aura des répercussions directes très importantes. La recherche agronomique et forestière mais aussi la recherche halieutique seront fortement sollicitées dans la recherche de stratégie d'adaptation.
- Du point de vue sociologique, les adaptations sur le plan des transports des modes de vie, du lien avec le territoire pourraient bouleverser les fonctionnements actuels. Ces tendances et l'acceptabilité des mesures d'adaptations sont un champ de recherche essentiel.
- Sur le plan de l'organisation institutionnelle et en dehors sans doute de la recherche fondamentale, les chercheurs manquent aussi de lisibilité sur les outils d'administration des politiques publiques dans le domaine de l'environnement (multiplications des structures parfois non coordonnées). Sur l'estuaire, le contexte des gestionnaires a pour nom : SAGE, SDAGE, DCE, PPRI, etc. Le GIP Littoral et le Réseau de Recherche Littoral devraient être des structures permettant d'aller dans le sens d'une meilleure intégration des disciplines scientifiques.

11 - BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle – *seconde édition* – Mission Interministérielle de l'Effet de Serre – 2000

Rapport du GIEC 2007 – Résumé à l'intention des décideurs : groupe de travail I - Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques – *traduction française de Pascale DELECLUSE (Météo-France) ; Marc GILLET (ONERC) ; Sylvie JOUSSAUME (LSCE) ; Jean JOUZEL (IPSL) ; Michel PETIT (CGTI)*

Rapport du GIEC 2007 – Résumé à l'intention des décideurs : groupe de travail II - Bilan 2007 des changements climatiques : impacts, adaptation et vulnérabilité – *traduction française*

LIVRE BLANC ESCRIME Étude des Scénarios Climatiques Réalisés par l'IPSL & Météo-France Edité par : Laurent Terray (CERFACS) et Pascale Braconnot (IPSL/LSCE) Avec le soutien de l'INSU, de l'ONERC et de l'IDDRI

Les tempêtes en France Article Annales des Mines **Pierre Bessemoulin** Directeur de la Climatologie à Météo France Août 2002

Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08 Christian Pagé Laurent Terray Julien Boé *Climate Modelling and Global Change* TR/CMGC/08/64 CERFACS 7 octobre 2008

Homogénéisation et étude des longues séries de Températures et de précipitations sur le département de la Gironde- extraits - Octobre 2007/ mai 2008 Etude réalisée par Météo-France DIRSO / Divisions Etude et Climatologie En partenariat avec le Conseil Général de la Gironde Avec le soutien technique de Sylvie JOURDAIN (DCLIM/ DEV)

Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France Julien BOE Thèse de l'Université PAUL SABATIER - TOULOUSE III Ecole doctorale "Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace" U.F.R. Physique Chimie Automatique ; le 23 novembre 2007

Etat des lieux et diagnostic du Sage de l'estuaire de la Gironde et des milieux associés Smiddest Eaucéa 2007/2008

Etude d'impact pour l'entretien du chenal et des installations portuaires établie pour le PAB en 2002

Modélisation simplifiée du bouchon vaseux de la Gironde Modèle Sturio Eaucéa Novembre 2007

Changement Globaux : les enjeux pour l'eau Agence de l'eau Adour Garonne Colloque à Toulouse 7 novembre 2007

Etat des lieux et proposition de recommandations relatifs à la connaissance des impacts du changement climatique sur le bassin de la Loire EP Loire Safège Biotope Rapport Avril 2008

Les relations trophiques : éléments de structuration des peuplements ichtyologique en milieu estuarien Application à la Gironde. Stéphanie Pasquaud *Thèse de l'Université Bordeaux I Ecole Doctorale science du vivant - Géosciences –Sciences de l'environnement* Septembre 2006

Adaptation du modèle STICS à la vigne (vitis vinifera L.) Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France Iñaki Garcia de Cortazar Atauri *Thèse de l'ENSAM Ecole doctorale: Biologie des Systèmes Intègres – Agronomie – Environnement* Décembre 2006

Projet Carbofor Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestier en France ; Ecofor n° 2002 17 ; INRA 4154B ; V Badeau, JL Dupouey C Cluzeau, J Drapier, C Le Bas *Juin 2004*

Personnes rencontrées

La liste des personnes rencontrées ayant contribué à l'établissement de cette synthèse devrait comprendre les très nombreux contributeurs au Sage Estuaire de la Gironde et Milieux associés, substrat de l'information visée dans ce rapport.

Que soit cité en particulier

BARON Jérôme	SMIDDEST
CASTAING	Université Bordeaux 1 – UMR EPOC
CASTRO	CRPF
DESMAIZIERES Laure	Météo-France/DIRSO
DOUCET Carole	Conseil Régional, Dir. Recherche
DUPOUEY Marie-Agnès	Port autonome de Bordeaux
GAECKLER Martine	Agence de l'Eau Adour-Garonne
GONTHIER Paul	CEMAGREF Bordeaux
KREMER	INRA Bordeaux
LASALLE Géraldine	CEMAGREF Bordeaux
LETOUZE	Service police de l'eau Gironde
LOUSTAU Denis	INRA Bordeaux
LUNDY Didier	EDF-CNPE du Blayais
MARTINI Frédérique	MEEDDAT/DE
PAGE Christian	CERFACS
ROCHARD Eric	CEMAGREF Bordeaux
SAUTOUR Benoît	Université Bordeaux 1 – UMR EPOC
SOTTOLICHIO Aldo	Université Bordeaux 1 – UMR EPOC
TERRAY Laurent	CERFACS
WITTEWER Caroline	MEEDDAT/SCHAPI

Rédacteurs : Bruno Coupry , Mathieu Neau, Timothée Leurent
Eaucéa octobre 2008