PROJET DE FIN D'ETUDES : INCENDIE DES LANDES DU MÉDOC

GE9EPFE - Projet de fin d'étude (Alexandre PRYET)

Anaïs BORNE

Enzo BRONNEC-CASTANET DESAGES

05/03/2025

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements **3**
Introduction **4**
I-) Observation de l'effet de l'incendie sur la nappe libre plio-quaternaire **7**
I.1-) La nappe Plio-Quaternaire (dite "nappe des sables") 7
I.2-) Modélisation du niveau de la nappe 8
I.3-) L'utilisation du modèle comme outil de représentation de l'environnement d'étude 11
I.4-) Calage du modèle sur la période avant l'incendie 13
I.5-) Etude de la piézométrie de la nappe après l'incendie 16
I.6-) Les vecteurs d'incertitude 20
II-) Estimation du coefficient cultural du pin maritime **22**
II.1-) La Forêt des Landes de Gascogne et le pin maritime 22
II.2-) Le coefficient cultural 22
II.3-) Modèle conceptuel à réservoir du sol 23
II.4-) Estimation du coefficient cultural du pin maritime 26
Conclusion **29**
Bibliographie **31**

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Températures maximales atteintes en Europe entre le 17 et 23 juillet 2022 | Source : NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)..... 4
Figure 2 : Localisation de la commune de Saumos et cartographie des incendies forestiers de l'été 2022 en Gironde..... 5
Figure 3 : Bilan hydrique du système arbre|sol et représentation du comportement évapotranspiratoire de l'arbre..... 8
Figure 4 : Schéma représentant la démarche adoptée afin d'étudier l'effet potentiel de l'incendie sur la piézométrie de la nappe Plio-Quaternaire..... 9
Figure 5 : Emplacement des piézomètres de l'AMAF et des crastes..... 10
Figure 6 : Calage du modèle au piézomètre P5bis..... 13
Figure 7 : Calage du modèle au piézomètre P6..... 14
Figure 8 : Calage du modèle au piézomètre P36..... 15
Figure 9 : Simulation post-incendie de la piézométrie de la nappe au piézomètre P5bis..... 16
Figure 10 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P5bis..... 17
Figure 11 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P6..... 18
Figure 12 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P36..... 19
Figure 13 : Résidus observés lors du calage du modèle au piézomètre P5bis..... 20
Figure 14 : Bilan hydrique du système sol|végétation réalisé par SWB..... 23
Figure 15 : Chroniques de précipitation et flux de transpiration et de prélèvement racinaire simulés par SWB sur la saison estivale de 2023..... 24
Figure 16 : Evolution du bilan hydrique de SWB en fonction du coefficient cultural (Kc)..... 25
Figure 17 : Estimation graphique du coefficient cultural du pin à partir de l'évolution des termes d'évapotranspiration modélisés par SWB..... 26
Figure 18 : Peuplement de molinies deux ans après l'incendie..... 27

Remerciements

Nous souhaitons remercier en préambule toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.
Tout d'abord, nous tenons à remercier Alexandre PRYET, encadrant de ce PFE, pour son accompagnement et ses conseils pour orienter ce projet dans la bonne direction et mener la recherche au mieux.

Nous remercions chaleureusement Maureen BARTOLI et Estelle JARDOT, membres du SIAEBVELG (Syndicat Intercommunal d'Aménagement des Eaux du Bassin Versant et Étangs du Littoral Girondin) et intermédiaires entre le terrain et nous-même, pour leur suivi et leur intérêt pour ce projet. Leur appui nous permit de mieux appréhender la problématique et d'obtenir des informations primordiales ayant motivé ce PFE.

Enfin, un grand merci aux membres de l'AMAF (Association pour le Maintien de l'Activité Forestière en Médoc) et plus particulièrement à Jean PERAGALLO et Michel ROBERT pour leur accueil sur leur domaine et le partage de leurs expériences. Ce projet n'aurait au demeurant pas pu exister sans les données précieuses récoltées aux ouvrages de suivi implantés sur les parcelles sylvicoles.

Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique, notre société se voit contrainte d'adopter une dynamique de réduction de nos impacts environnementaux et d'adaptation face aux changements globaux impactant le climat et toute la biosphère terrestre. Les nombreuses études et recherches s'inscrivant dans cette démarche visent notamment à utiliser nos connaissances et les données climatiques passées et actuelles afin de proposer des estimations du futur de notre planète. Depuis quelques années déjà, le changement climatique est une réalité palpable pour de nombreuses régions du monde et leurs habitants. La démographie grandissante mêlée à une hausse globale des températures, des évènements climatiques extrêmes plus nombreux ou des inquiétudes grandissantes vis-à-vis de la ressource en eau, ne sont que quelques enjeux auxquels nous serons sans cesse davantage confrontés dans les années à venir.

A l'échelle de l'Europe occidentale et centrale, l'été 2022 est aujourd'hui un marqueur du changement climatique et une référence – vouée malheureusement à se répéter et à s'accentuer – en matière d'événements de sécheresse exceptionnels. De juin à septembre, la France fut marquée par 33 jours de canicule et des températures supérieures à 40°C sur l'ensemble de son territoire, faisant de cet épisode caniculaire le deuxième plus important de son histoire, après celui d'août 2003, depuis le début des mesures de *Météo-France* en 1947. La figure 1 ci-dessous montre les températures maximales atteintes en Europe entre le 17 et le 23 juillet 2022, au pic de la canicule estivale de 2022.

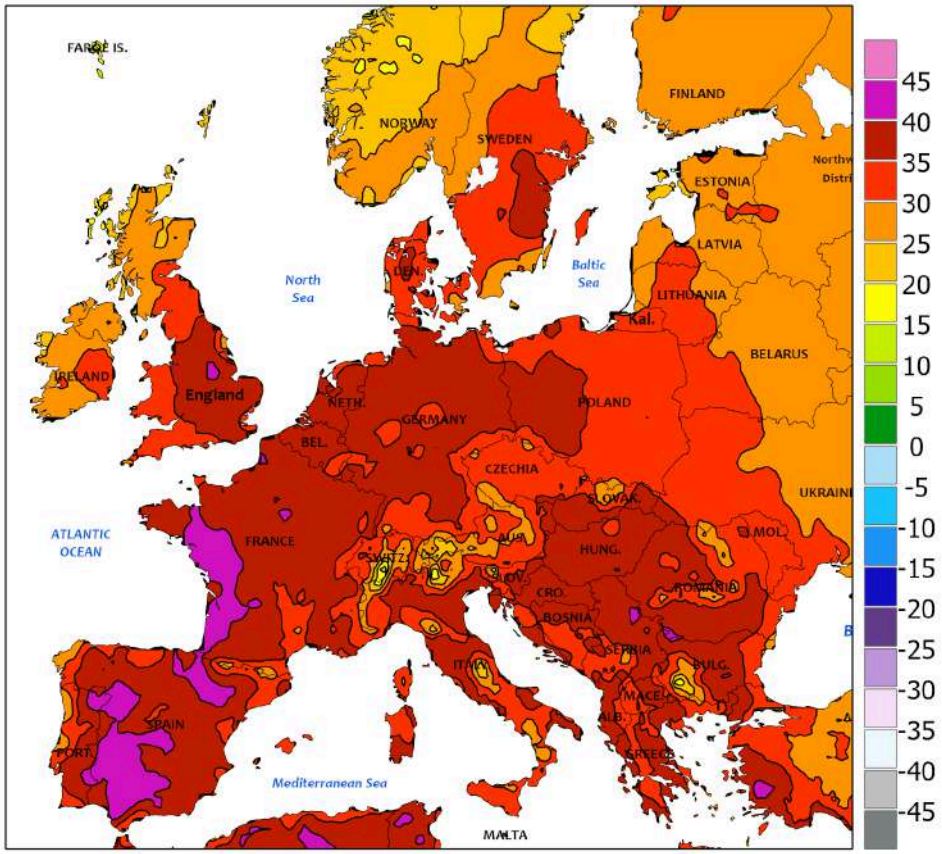

Figure 1 : Températures maximales atteintes en Europe entre le 17 et 23 juillet 2022 | Source : NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

Sur les huit mois précédents, le département de la Gironde (33) avait connu le cumul de précipitations le plus faible depuis 1959. A partir de l'arrivée des températures records de juillet 2022, la Forêt des Landes de Gascogne déjà asséchée, connut dans sa partie girondine d'importants incendies jusqu'au milieu du mois de septembre. Ces feux ravagèrent près de 30 000 hectares de forêt et conduisirent à l'évacuation de 45 000 personnes. Après les incendies de juillet, le premier aux abords de la dune du Pilat et de Cazaux sur la commune de La Teste-de-Buch et le deuxième entre les communes de Landiras et Belin-Béliet (qui connaîtra une reprise au mois d'août), c'est dans le Sud-Médoc que se déclare un troisième incendie le 12 septembre, sur les communes de Saumos, de Sainte-Hélène et du Temple.

Durant cet après-midi du 12 septembre 2022, les flammes encerclent rapidement la commune de Saumos, avant de se propager en direction du Temple et de Sainte-Hélène, obligeant les autorités à procéder à l'évacuation de 1800 personnes. Après quatre jours de lutte, les 600 pompiers parviennent à fixer l'incendie, malgré des fumées persistantes sur les sols calcinés. Cet incendie, marquant la fin d'une saison inédite d'incendies forestiers en Gironde, emporta avec lui 3200 hectares de pins maritimes. Comme pour la majeure partie de la Forêt des Landes de Gascogne, les parcelles brulées sont privées et destinées à la sylviculture, faisant des sylviculteurs les grandes victimes de ces évènements. La figure 2 ci-dessous montre la localisation et l'étendue des trois incendies majeurs ayant touché le département de la Gironde durant les feux de l'été 2022.

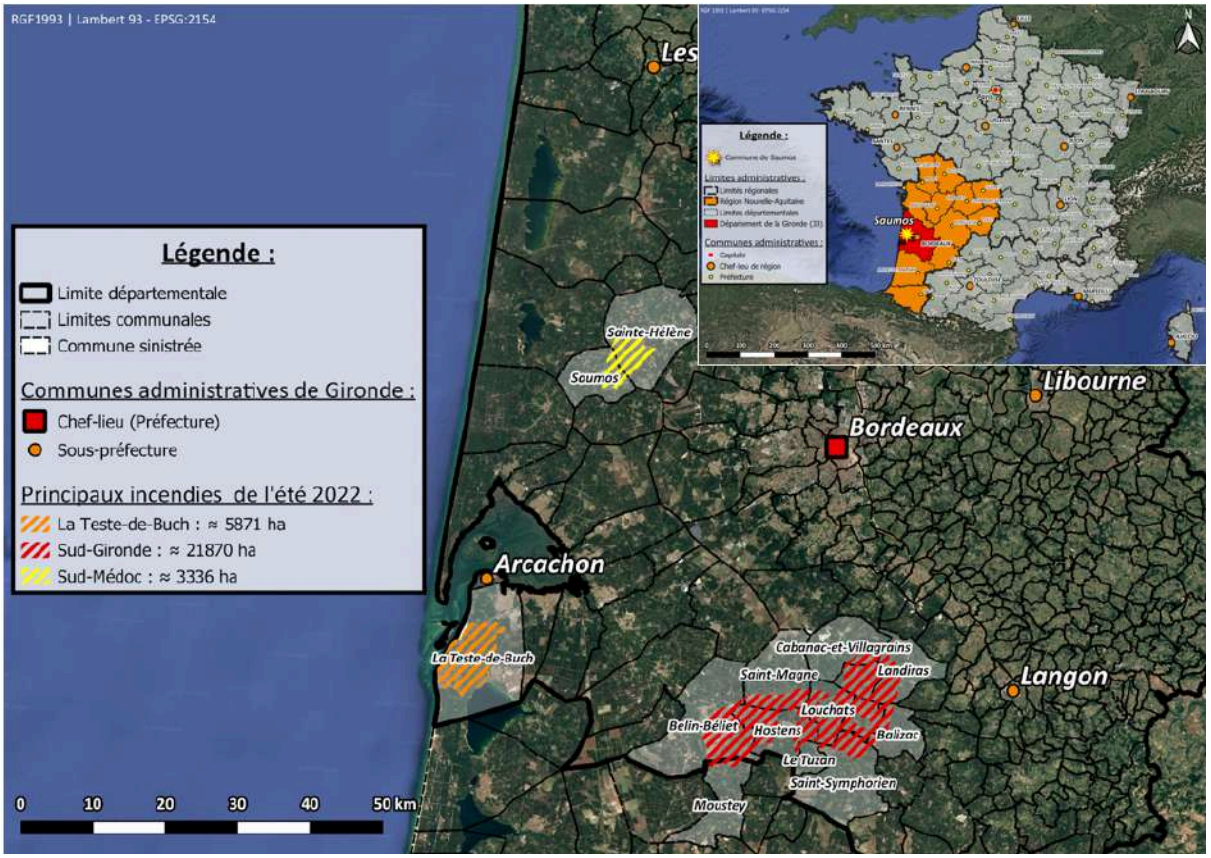

Figure 2 : Localisation de la commune de Saumos et cartographie des incendies forestiers de l'été 2022 en Gironde

La sylviculture est une activité historique patrimoniale du Triangle Landais et participe à soutenir une économie locale importante pour la région, générant des dizaines de milliers d'emplois directs et indirects et contribuant au dynamisme de ces territoires ruraux. L'AMAF (l'Association pour

le Maintien de l'Activité Forestière en Médoc) est une association initialement créée en tant qu'entité d'opposition au projet de champs captants "des Landes du Médoc" porté par Bordeaux Métropole et visant à exploiter la nappe captive Oligocène afin de produire dix millions de mètres cube d'eau annuels à destination de l'agglomération bordelaise et des territoires périphériques. Les adhérents s'inquiètent de l'impact que pourrait avoir une telle exploitation sur leur territoire et l'activité sylvicole et souhaitent faire entendre leurs craintes, notamment vis-à-vis d'une baisse de niveau de la nappe superficielle du Plio-Quaternaire, essentielle dans la croissance des pins et en relation indirecte avec l'aquifère Oligocène sous-jacent par le biais d'épontes. La volonté de l'AMAF en collaboration avec le Syndicat des Sylviculteurs est d'établir une opposition constructive avec les décideurs autour de ce projet initié par et pour la métropole bordelaise en amenant davantage la parole médocaine dans les discussions.

Dans l'objectif de dresser un état initial de la nappe Plio-Quaternaire pour démontrer l'influence des champs captants sur celle-ci, l'AMAF procède à un suivi piézométrique mensuel de cette dernière par le biais de piézomètres installés autour du bourg de Saumos. Dans les mois suivant le ravage causé par l'incendie de septembre 2022, les sylviculteurs semblent déceler une hausse générale du niveau de la nappe. Ces hauteurs piézométriques plus hautes qu'en temps normal sont alors attribuées au changement brutal d'occupation du sol en surface, passant d'une forêt de pins âgés d'une quarantaine d'années, à un environnement inerte, rapidement repeuplé par des espèces pionnières. La genèse du travail, dont ce rapport fait le bilan, repose sur cesdites observations et a conduit à l'étude de l'impact de cet incendie sur les niveaux de la nappe Plio-Quaternaire. En considérant l'absence soudaine des arbres comme l'élément majeur ayant modifié le secteur d'étude et différenciant la période avant l'incendie de la période après celui-ci, les éventuelles différences constatées dans les valeurs mesurées pourront être reliées aux prélèvements des pins dans la nappe. Ces observations seront par la suite une ouverture pour s'intéresser au coefficient cultural du pin maritime, un paramètre fondamental décrivant le comportement évapotranspiratoire général de l'arbre dans les Landes du Médoc.

I-) Observation de l'effet de l'incendie sur la nappe libre plio-quaternaire

I.1-) La nappe Plio-Quaternaire (dite "nappe des sables")

La nappe phréatique superficielle du Plio-Quaternaire est une unité aquifère libre, d'une épaisseur variant de 0 à 60 m, pentée faiblement vers l'ouest, s'étendant sur la quasi-totalité des Landes de Gascogne soit sur une superficie de 13 500 km^2 et se retrouvant en position subaffleurante sur les ⅔ de sa surface. Cette formation sédimentaire du Bassin aquitain est constituée de dépôts fluviatiles du Plio-Pléistocène à sa base et de sables éoliens quartzeux très purs, meubles et de granulométrie hétérogène du Pléistocène sur sa partie supérieure (Légigan, 1979). La nappe est essentiellement alimentée par l'infiltration directe des précipitations (de 800 à 1000 millimètres par an dans le Médoc) à travers les podzosols drainants quasi exclusivement sableux des Landes, permettant une infiltration généralement rapide en profondeur de l'ordre de 50 à 60 $cm \cdot h^{-1}$ en moyenne. Elle est principalement drainée par le réseau hydrographique naturel dirigé vers le littoral aquitain ainsi que par les crastes. Les crastes sont des fossés de drainage creusés par les sylviculteurs permettant d'évacuer les surplus d'eau en période hivernale, qui peuvent conduire à l'engorgement du sol dont la faible cohésion et la porosité importante induisent une réserve utile faible et une saturation rapide (Vernier et Castro, 2010). Ces tranchées permettent donc de prévenir des situations d'anoxie racinaire découlant de l'engorgement des sols, mais également de maintenir l'accessibilité des chemins d'accès aux véhicules de défense contre les incendies (DFCI). Néanmoins, la création de crastes est encore aujourd'hui une pratique traditionnelle et une démarche individuelle à l'échelle de la, ou des parcelles d'un sylviculteur. Dans un contexte de changement climatique où le stockage des eaux hivernales pour supporter les stress hydriques à prévoir durant l'été apparaît comme un besoin, de nouvelles propositions techniques sont préconisées pour la réalisation de ce type de système de drainage anthropique.

La position superficielle de la nappe Plio-Quaternaire en fait une réserve d'eau accessible et mobilisable par les racines pour satisfaire les besoins évapotranspiratoires des pins en période de déficit hydrique. L'horizon racinaire des arbres peut explorer jusque dans les trois premiers mètres du sol – ou jusqu'à un mètre seulement dans un environnement de lande humide – leur permettant ainsi de pallier la réserve utile limitée du sol sableux ou les stress hydriques estivaux en ayant recours à du prélèvement racinaire (Bakker et al., 2006). Les précipitations hivernales et la réserve en eau en découlant à la fin du printemps sont donc déterminantes pour le bien-être des pins maritimes durant l'été. Un suivi piézométrique du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) réalisé depuis les années 70 a permis de constater que l'évapotranspiration des strates végétales pouvait occasionner une baisse du niveau de la nappe pouvant atteindre un à deux centimètres par jour, sous couvert forestier en lande humide. Le schéma présenté en figure 1 illustre un bilan hydrique du système arbre|sol et montre les ressources mobilisées par l'arbre pour subvenir à ses besoins évapotranspiratoires.

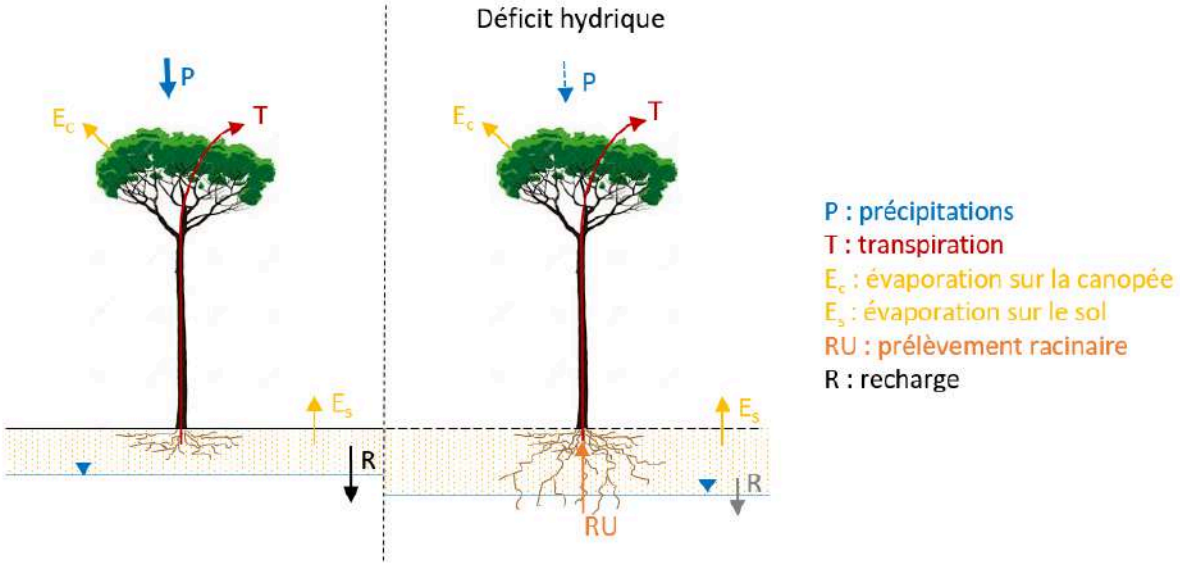

Figure 3 : Bilan hydrique du système arbre|sol et représentation du comportement évapotranspiratoire de l'arbre

Lorsque les variations de hauteur de nappe initient une alternance entre des conditions oxydantes et réductrices dans le sol, la matière organique amorphe associée à l'aluminium et au fer peuvent cimenter les grains de sable et ainsi former de l'alios. Ce phénomène lent, typique des Landes de Gascogne, conduit à créer des horizons ferrugineux indurés sous la forme de lentilles très localisées, discontinues et hétérogènes, empêchant certaines racines de poursuivre leur progression dans le sous-sol. Néanmoins, la faculté de l'alios à retenir l'humidité et emmagasiner l'eau ainsi que la présence de matière organique (humus) peut parfois augmenter d'un facteur deux la réserve utile du sol.

I.2-) Modélisation du niveau de la nappe

L'objectif de ce travail est d'analyser les fluctuations de hauteur de la nappe du Plio-Quaternaire, avant et après l'incendie, pour potentiellement déceler un effet des feux de forêt sur la piézométrie de l'aquifère, comme semble l'avoir constaté l'AMAF. La méthode consiste à utiliser un modèle capable de modéliser la chronique piézométrique de la nappe, en calculant quotidiennement la hauteur d'eau à partir des variables de forçage en l'état des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Les données climatiques et piézométriques avant l'incendie permettront de calibrer le modèle afin que ce dernier soit en mesure, par la suite, de simuler les variations piézométriques de la nappe à partir de nouveaux jeux de données de forçage. Une fois calibré, le modèle représentera le fonctionnement de la nappe dans une configuration "normale", c'est-à-dire en présence des pins sur la parcelle. Le modèle pourra alors être utilisé avec les données de forçage mesurées après l'incendie pour simuler la chronique piézométrique "théorique" sur cette période, dans une situation hypothétique où l'incendie n'aurait pas eu lieu. La comparaison des résultats de cette simulation et des mesures piézométriques effectivement réalisées sur la parcelle incendiée pourront alors permettre d'évaluer si le feu a eu un impact sur les niveaux de la nappe. Le schéma présenté en figure 2 illustre cette démarche.

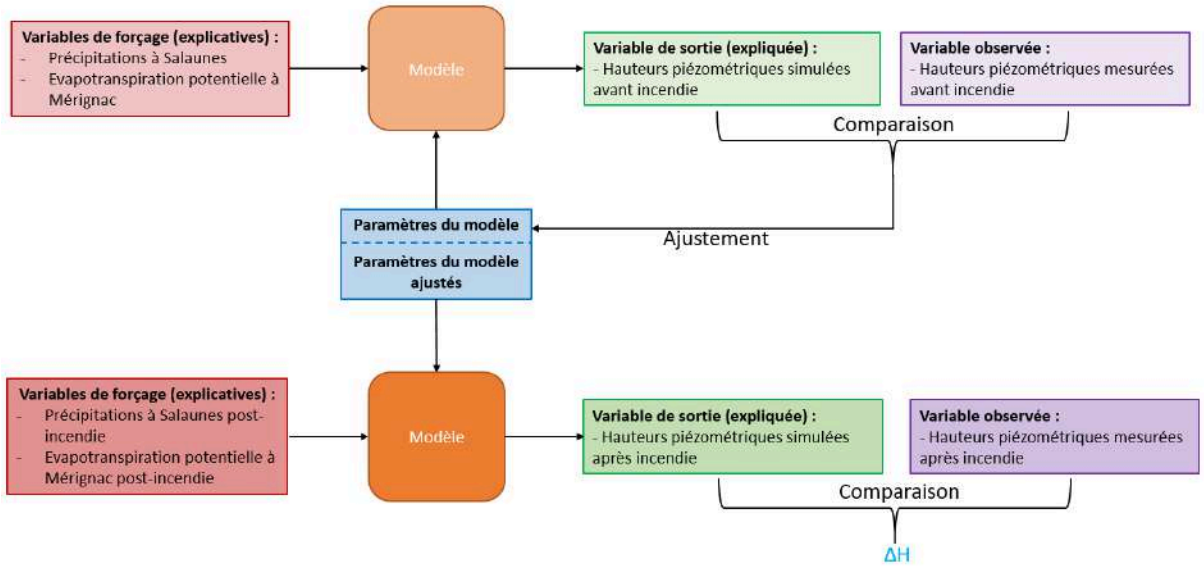

Figure 4 : Schéma représentant la démarche adoptée afin d'étudier l'effet potentiel de l'incendie sur la piézométrie de la nappe Plio-Quaternaire

Le module *Pastas* est une bibliothèque du langage de programmation *Python* conçue pour analyser et modéliser les fluctuations de niveau des nappes souterraines en réponse à différents forçages. *Pastas* est un outil de traitement du signal se présentant sous la forme d'un modèle à réservoir utilisant différentes fonctions de transfert afin de simuler l'effet des forçages sur le niveau de la nappe en prenant en compte les différents phénomènes entrant en jeu dans les processus hydrologiques (recharge, évapotranspiration, effets retardés, atténuation du signal etc.). La manière dont ces processus interagissent dans le modèle et influent sur les résultats en sortie est définie par différents paramètres internes au modèle dont la calibration est nécessaire pour qu'ils représentent au mieux le fonctionnement du milieu étudié. Ces paramètres n'ont pas nécessairement de signification physique intrinsèque mais définissent l'influence et la portée de l'ensemble des phénomènes faisant le lien entre les variables explicatives (les forçages) et les variables expliquées (dans ce cas, les hauteurs piézométriques).

Tout au long de l'étude, les historiques de précipitations communiquées en entrée du modèle sont ceux produits par la station *Météo-France* la plus proche de la zone d'étude, implantée sur la commune de Salaunes, à environ onze kilomètres au nord-est des parcelles incendiées. Cette station ne disposant que des instruments de mesure élémentaires, les données d'évapotranspiration utilisées sont issues de la station météorologique de Mérignac, située à une vingtaine de kilomètres à l'est de Saumos. A l'aide du grand nombre de dispositifs de mesure, les valeurs d'évapotranspirations potentielles (considérant donc une disponibilité permanente en eau) peuvent être calculées à l'aide la formule de Penman-Monteith (1) :

$$ET = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta\left(R_n - G\right) + \rho_a c_p\left(\frac{c_s - c_a}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

avec ET l'évapotranspiration potentielle ($mm \cdot j^{-1}$), ρ_a la masse volumique de l'air ($kg \cdot m^{-3}$), c_p la capacité thermique massique ($MJ \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$), γ la constante psychrométrique ($kPa \cdot °C^{-1}$), λ la chaleur latente de vaporisation ($MJ \cdot kg^{-1}$), Δ la pente de la courbe de pression de vapeur saturante ($kPa \cdot °C^{-1}$), r_a la résistance aérodynamique ($s \cdot m^{-1}$), r_s la résistance de surface ($s \cdot m^{-1}$), R_n la radiation nette ($MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$) et G le flux de chaleur vers le sol ($MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$).

Les données observées pouvant être qualifiées "de référence", utilisables pour le calage du modèle ou à des fins de comparaison avec les résultats simulés par ledit modèle, sont les chroniques des mesures de hauteur de la nappe du Plio-Quaternaire effectuées mensuellement par l'AMAF en milieu de mois. Les dates exactes des mesures étant inconnues, les valeurs correspondantes sont attribuées au quinze du mois. Les valeurs communiquées par l'association correspondent à la distance entre le sommet de la margelle du forage et le toit de la nappe. Les côtes piézométriques en mètres NGF (Niveau Général de la France) sont calculées à partir de la hauteur des margelles mesurée par l'AMAF et des altitudes fournies par la cartographie tridimensionnelle *LiDAR HD* mise à disposition par l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière). L'association de sylviculteurs dispose d'une cinquantaine de piézomètres sur des pinèdes à travers le Sud-Médoc, sur les communes de Saumos, Le Temple, Sainte-Hélène, Lacanau, Le Porge, Brach et Arès. Trois d'entre eux, situés dans la zone incendiée, seront utilisés pour l'étude : SAUM P5bis, SAUM P6 et STHE P36. La figure 5 ci-dessous illustre la répartition des piézomètres localisés au sein, et autour de la zone sinistrée – par soucis de commodité, les trois piézomètres d'intérêt seront désignés par la suite de ce rapport en omettant le préfixe désignant leur commune d'appartenance.

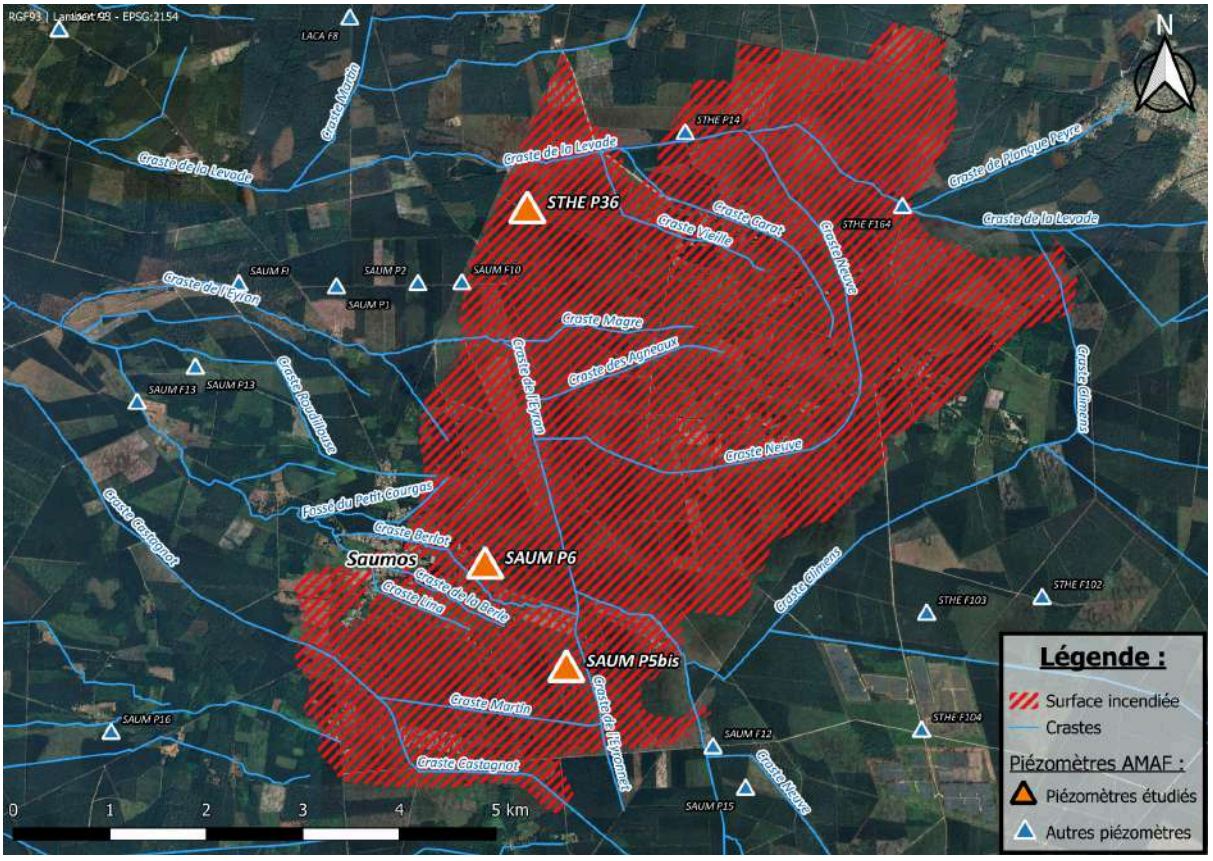

Figure 5 : Emplacement des piézomètres de l'AMAF et des crastes

I.3-) L'utilisation du modèle comme outil de représentation de l'environnement d'étude

Le calage du modèle sur la période avant l'incendie a pour objectif d'élaborer un outil capable de représenter le fonctionnement hydrologique de l'environnement d'étude dans sa configuration "de base", c'est-à-dire en présence de la végétation habituelle de la Forêt des Landes, composée d'une strate arbustive de pins maritimes (*Pinus pinaster*), et dans le cas d'une lande plutôt humide, d'un sous-bois souvent peuplé de graminées (famille des *Poaceae*) comme les molinies (famille des *Molinia*). L'incendie ayant débuté le 12 septembre et les hauteurs piézométriques étant connues pour les 15 de chaque mois, la fin de la période de calage avant l'incendie est fixée au 15 août 2023. Pour les piézomètres P5bis et P6, sept années de données sont disponibles, à partir du 15 avril 2015 ; le suivi de la nappe à P36 n'ayant débuté que le 15 juillet 2020, la période de calage est réduite à deux années pour ce piézomètre. La période d'étude après l'incendie s'étend quant à elle pour tous les piézomètres du 15 septembre 2022 au 15 septembre 2024, soit deux années d'observation du fonctionnement de l'environnement hydrologique de ces parcelles après les feux de forêt.
Il est également à noter que les observations faites au piézomètre P6 devront être recontextualisées en considérant la présence dans un rayon inférieur au kilomètre de plusieurs crastes dont l'incision mêlée à un substrat sableux très drainant peuvent significativement influencer localement la nappe : la Craste Berlot à environ 140 mètres, la Craste de la Berte à environ 470 mètres et la majeure Craste de l'Eyron à environ 850 mètres. Le piézomètre P36 se situe à environ 550 mètres d'une unique craste, celle de la Levade, une distance suffisante compte tenu de la taille plus modeste de cette dernière comparativement à celle de l'Eyron, pour ne pas influencer les mesures. Le piézomètre P5bis se trouve quant à lui à environ 220 mètres de la Craste de l'Eyronnet et à 540 mètres de la Craste Martin, fossés de drainage mineurs ne pouvant vraisemblablement pas jouer sur les niveaux piézométriques relevés à cet ouvrage.

Bien que l'aquifère Plio-Quaternaire puisse avoir un comportement variable au cours de l'année, une nappe libre sableuse superficielle à affleurante comme celle-ci peut être considérée comme un système hydrologique temporellement réactif aux impulsions en entrée. Cette considération amène à configurer une période d'initialisation du modèle d'un an, permettant aux réservoirs de se mettre à l'équilibre avec les entrées et les sorties du modèle, tout en laissant au moins une année de données (pour le piézomètre P36) pour quantifier la performance du modèle.
L'estimation de la performance du modèle est faite via le calcul de trois indicateurs statistiques : la racine de l'erreur quadratique moyenne désignée par la suite sous l'acronyme RMSE (Root-Mean-Square Error), le critère de Nash-Sutcliffe désigné par la suite sous l'acronyme NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient) et le biais statistique qui pourra être désigné par la suite sous l'acronyme MBE (*Mean Bias Error*).
La RMSE est une mesure de la différence moyenne entre les valeurs simulées par le modèle et les valeurs observées, en attribuant un poids plus important aux écarts importants. Plus sa valeur se rapproche de 0, plus les simulations du modèle se rapprochent des valeurs réelles. Le calcul de la RMSE se fait avec l'équation ci-dessous (2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \widehat{y}_i\right)^2} \quad (2)$$

avec $RMSE$ la racine de l'erreur quadratique moyenne (m), n le nombre de valeurs de la série observée et simulée (–), y_i les i[èmes] valeurs mesurées (m) et $\widehat{y}_i$ les i[èmes] valeurs simulées (m).

Le NSE est un critère statistique permettant d'évaluer la performance prédictive d'un modèle, dont le résultat est compris dans l'intervalle $]-\infty ; 1]$. Une valeur du NSE égale à 0,5 signifie que la fiabilité du modèle est équivalente à considérer la moyenne de la série des valeurs observées comme estimation – une valeur inférieure traduirait une mauvaise efficience du modèle. Il est généralement admis qu'un NSE supérieur à 0,7 permet de qualifier un modèle comme satisfaisant. Le calcul de ce critère consiste à soustraire à la valeur 1 le quotient de la MSE (*Mean-Square Error*) sur la variance des valeurs observées ou bien à partir de sa formule développée telle que dans l'équation ci-dessous (3).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \widehat{y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \overline{y}\right)^2} \quad (3)$$

avec NSE le critère de Nash-Sutcliffe (–), n le nombre de valeurs de la série observée et simulée (–), y_i les i[èmes] valeurs mesurées (m), $\widehat{y}_i$ les i[èmes] valeurs simulées (m) et $\overline{y}$ la moyenne de la série des valeurs mesurées.

Lorsqu'il est utilisé pour évaluer un modèle, le biais, ou erreur moyenne, est un indicateur statistique mesurant la tendance d'un modèle à surestimer ou sous-estimer les valeurs observées. Une valeur finale négative renvoie à une tendance générale du modèle à la sous-estimation tandis qu'une valeur positive révèle une tendance générale du modèle à la surestimation. Bien qu'une valeur de MBE proche de 0 soit théoriquement l'issue souhaitée, un tel résultat ne signifie pas nécessairement que le modèle parvient à estimer précisément les valeurs observées. En effet, un biais quasi-nul peut être le fruit d'une compensation des surestimations et sous-estimations successives réparties sur toute la série de données. Lorsqu'il a pour vocation de quantifier l'erreur moyenne, le biais se calcule suivant la formule suivante (4).

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{y}_i - y_i\right) \quad (4)$$

avec MBE le biais ou erreur moyenne (m), n le nombre de valeurs de la série observée et simulée (–), y_i les i[èmes] valeurs mesurées (m) et $\widehat{y}_i$ les i[èmes] valeurs simulées (m).

Le biais ne renvoyant donc qu'une unique valeur pour l'ensemble de la période de simulation, la propension du modèle à surestimer ou sous-estimer les valeurs observées pourra également être appréciée graphiquement par la représentation des résidus. Cette différence faite entre les valeurs simulées par le modèle et les valeurs mesurées (la différence pouvant tout autant se faire dans l'autre sens) permet d'observer le comportement du modèle tout au long de la simulation à l'égard de ses prédictions des données de référence. Cet examen permet de compléter l'analyse de fiabilité

du modèle et rend possible la détection d'éventuelles tendances du modèle que la valeur unique de biais occulterait.

I.4-) Calage du modèle sur la période avant l'incendie

Les figures 6, 7 et 8 qui suivent rendent compte graphiquement du calage du modèle pour les trois piézomètres étudiés. Elles mettent d'une part en confrontation les prédictions du modèle avec les valeurs de référence mesurées et présentent d'une autre part les éléments d'évaluation de performance dudit modèle en l'état de la courbe des résidus et des valeurs de RMSE, NSE et MBE.
La figure 6 ci-dessous conclut le calage du modèle au piézomètre P5bis, jugé comme étant celui avec le meilleur potentiel d'obtention de résultats relevant uniquement de la disparition des pins.

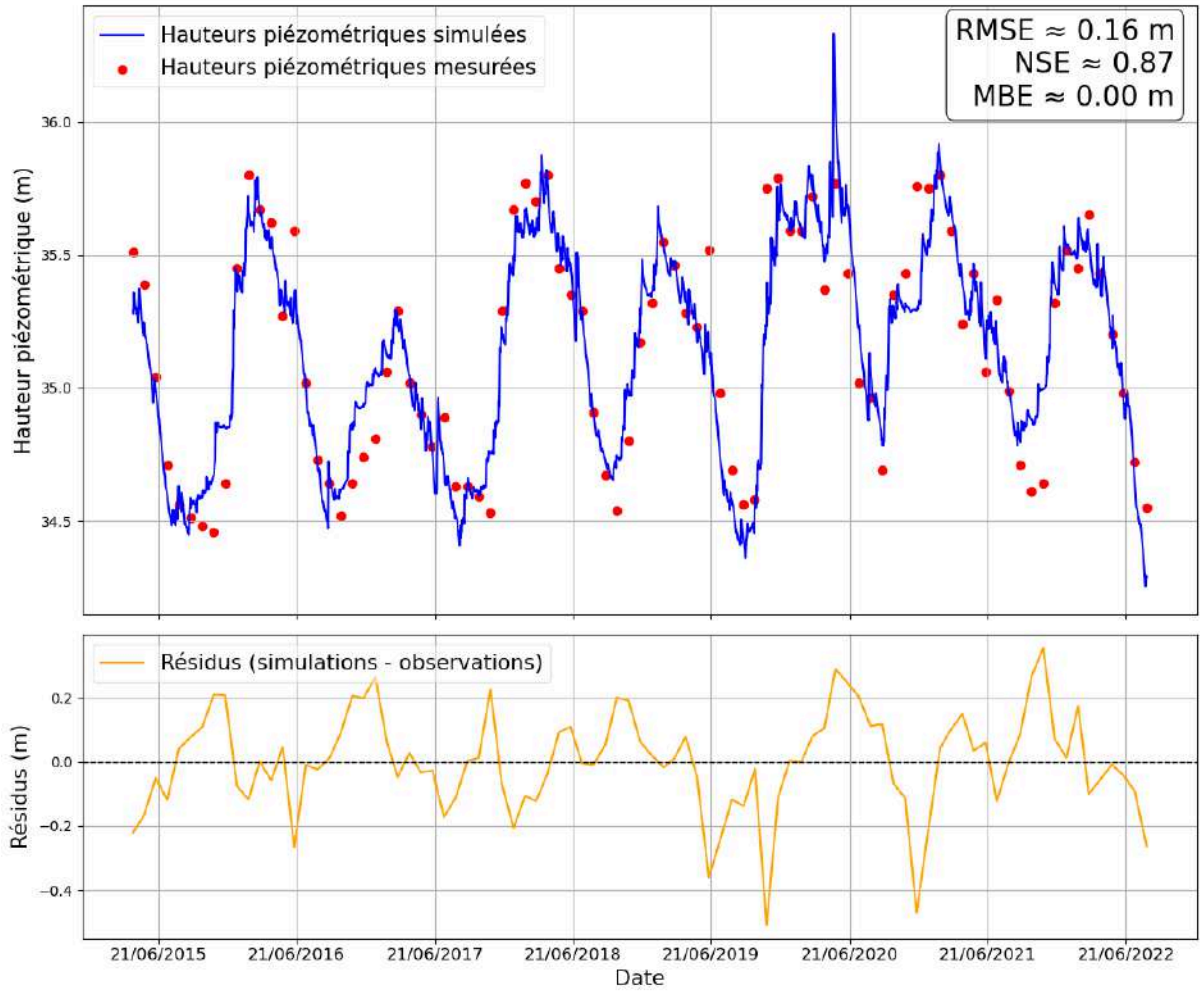

Figure 6 : Calage du modèle au piézomètre P5bis

Le calage du modèle à ce piézomètre s'avère très satisfaisant. La valeur de NSE laisse entendre une très bonne efficacité du modèle, confirmée par une valeur de RMSE d'environ 16 cm, qui en comparaison avec la gamme de variations des hauteurs piézométriques d'environ 150 cm, apparaît comme très encourageante. Le biais proche de zéro ne suggère aucune sous-estimation ou surestimation générale du modèle, comme cela est confirmée par le graphique des résidus, montrant des différences intermittemment positives et négatives sans tendance claire, et des maxima (en

valeur absolue) d'environ 40 cm, soit environ 25% de l'intervalle de variation des hauteurs piézométriques.
La figure 7 ci-dessous présente les résultats du calage du modèle au piézomètre P6, dont le contexte hydrogéologique est marqué par la présence de la Craste de l'Eyron à une centaine de mètres.

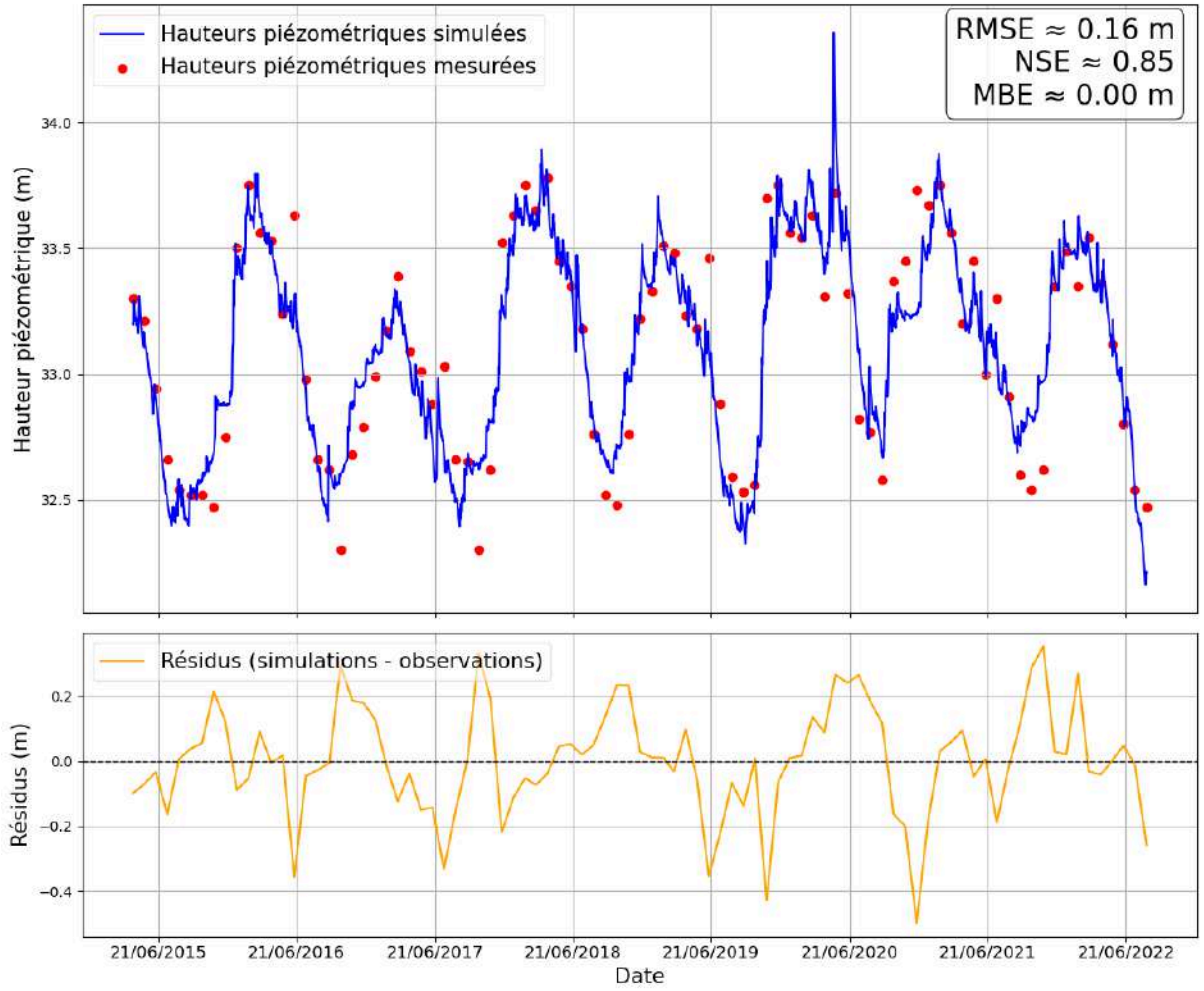

Figure 7 : Calage du modèle au piézomètre P6

Le calage sur les données issues de ce piézomètre aboutit à un modèle dont la performance est comparable au précédent ; les valeurs de RMSE et de NSE sont semblables et des commentaires analogues peuvent être faits au regard des résidus.
La figure 8 fait suite au calage du modèle sur les deux années de données disponibles au piézomètre P36.

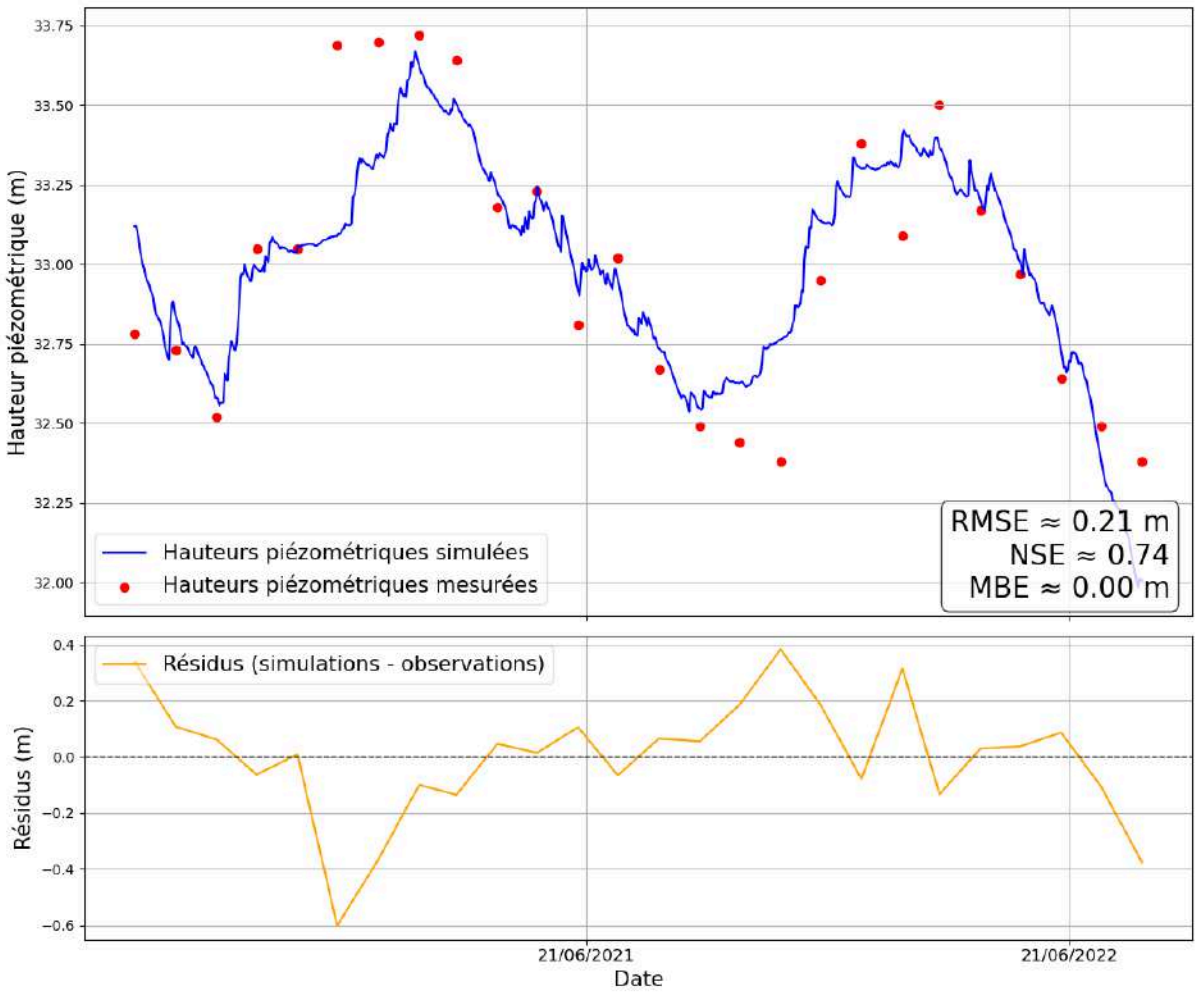

Figure 8 : Calage du modèle au piézomètre P36

La période réduite sur laquelle le calage du modèle est réalisé semble influer modérément sur la performance de celui-ci. Cependant, malgré une valeur de NSE plus faible que pour les deux autres modèles, un tel résultat reflète tout de même un modèle plutôt performant. Un pic résiduel de 60 cm sur un intervalle de variation des hauteurs piézométriques légèrement plus réduit que sur les deux jeux de données précédents reste néanmoins à relever.

Cette étape de calage de modèle s'achève sur un bilan plutôt positif. Cette démarche a permis de forger des modèles performants, aptes à modéliser les variations piézométriques de la nappe de manière efficace, en engendrant des incertitudes et erreurs tolérables compte-tenu de la gamme de valeur sur laquelle les hauteurs piézométriques s'échelonnent. La modélisation du fonctionnement hydrologique de l'environnement de ces trois piézomètres semble pouvoir permettre de réaliser une étude légitime de la période après l'incendie.

I.5-) Etude de la piézométrie de la nappe après l'incendie

Le calage du modèle effectué précédemment avec les données issues de la période avant l'incendie a permis de déterminer les paramètres représentatifs du fonctionnement hydrologique de l'environnement d'étude. Le modèle peut alors être utilisé afin de prédire l'évolution du niveau de la nappe, en fonction de n'importe quelles variables de forçage correspondantes. Pour cette étude, les simulations porteront donc sur la période après l'incendie, pour laquelle le modèle va modéliser l'évolution supposée de la piézométrie de la nappe Plio-Quaternaire, dans des conditions "normales" fictives en omettant volontairement l'incendie. L'objectif n'est donc plus d'ajuster le modèle aux observations en faisant varier les paramètres, mais bien d'utiliser le modèle en tant qu'outil de prédiction, en fixant les paramètres de celui-ci. Les relevés piézométriques de l'AMAF ne sont donc plus considérés comme des "valeurs de référence" et ne seront représentés qu'à des fins de comparaison. La figure 9 ci-dessous compare l'évolution présumée de la nappe, simulée par le modèle, et les mesures réalisées sur le terrain.

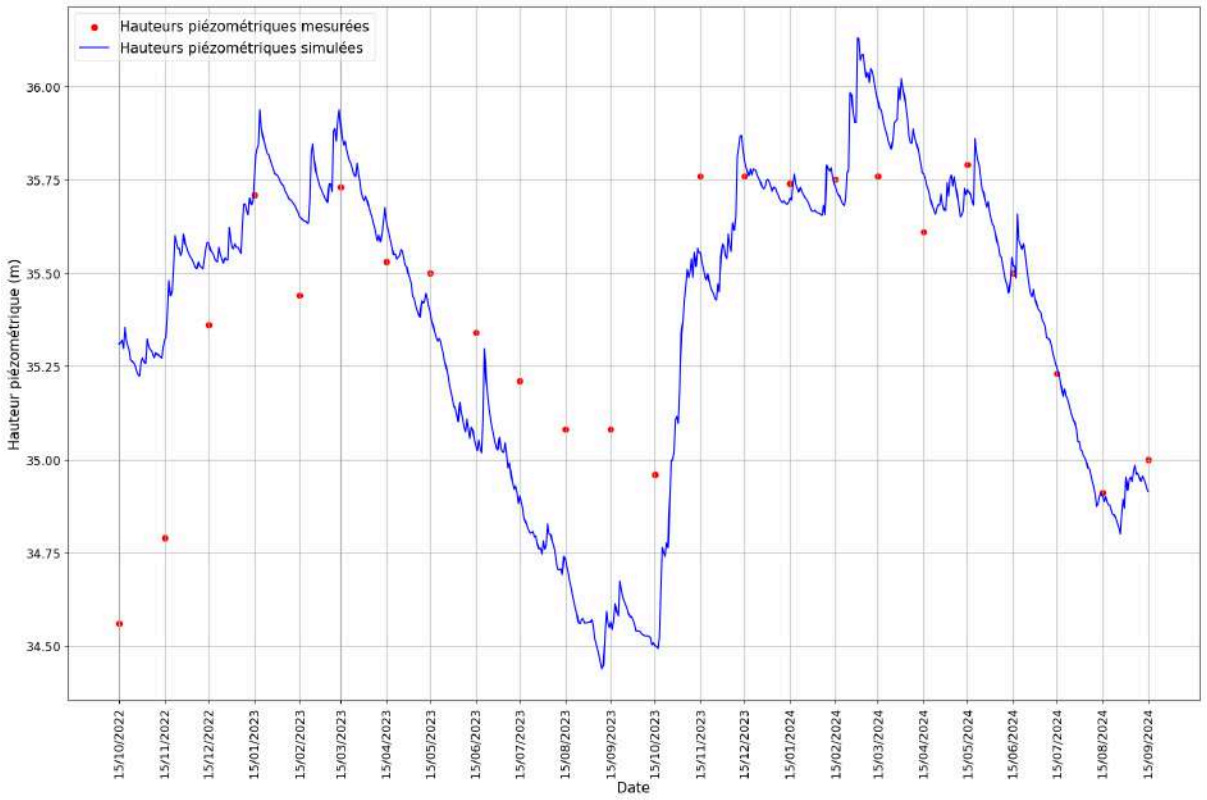

Figure 9 : Simulation post-incendie de la piézométrie de la nappe au piézomètre P5bis

La première observation pourrait être la forte surestimation de la hauteur piézométrique les deux premiers mois suivant l'incendie. Cet écart est vraisemblablement lié à la maigreur des précipitations ayant précédé l'été 2022 et à la sécheresse intense ayant sévi jusqu'au mois de septembre. Après le début de la saison de recharge hivernale, le modèle et les mesures semblent retrouver un semblant de concordance ; tendance également observée à la période hivernale suivante en 2024, avec une justesse accrue des prédictions du modèle. Cette simulation permet en revanche d'observer une période estivale en 2023 particulièrement intéressante du point de vue de cette étude. En effet, malgré une bonne correspondance du modèle avec les mesures entre le mois d'avril et de mai, un écart grandissant est observé tout au long de l'été, jusqu'au mois d'octobre. Cette remarque fait écho

aux observations des membres de l'AMAF ayant constaté des niveaux de la nappe plus hauts depuis le passage de l'incendie. En considérant l'incendie comme un événement soudain à l'échelle des observations, ayant modifié l'environnement simulé par le modèle, cette discordance peut être attribuée à un fonctionnement différent de la parcelle nouvellement dépourvue d'arbres. Cette différence de hauteur piézométrique peut être interprétée comme l'eau habituellement prélevée dans la nappe par la végétation pour parfaire leurs quotas évapotranspiratoires durant l'été. Les déficits de prélèvement en nappe s'additionnent donc tout au long de la saison estivale, combinant des besoins évapotranspiratoires importants et des faibles précipitations, jusqu'à l'obtention d'une différence maximale $\Delta H \approx 46\,\mathrm{cm}$ entre le modèle et les mesures au 15 octobre (comme illustrée sur la figure 10), correspondant à la quantité d'eau dont aurait eu besoin la végétation pour compenser les déficits hydriques de cet été.

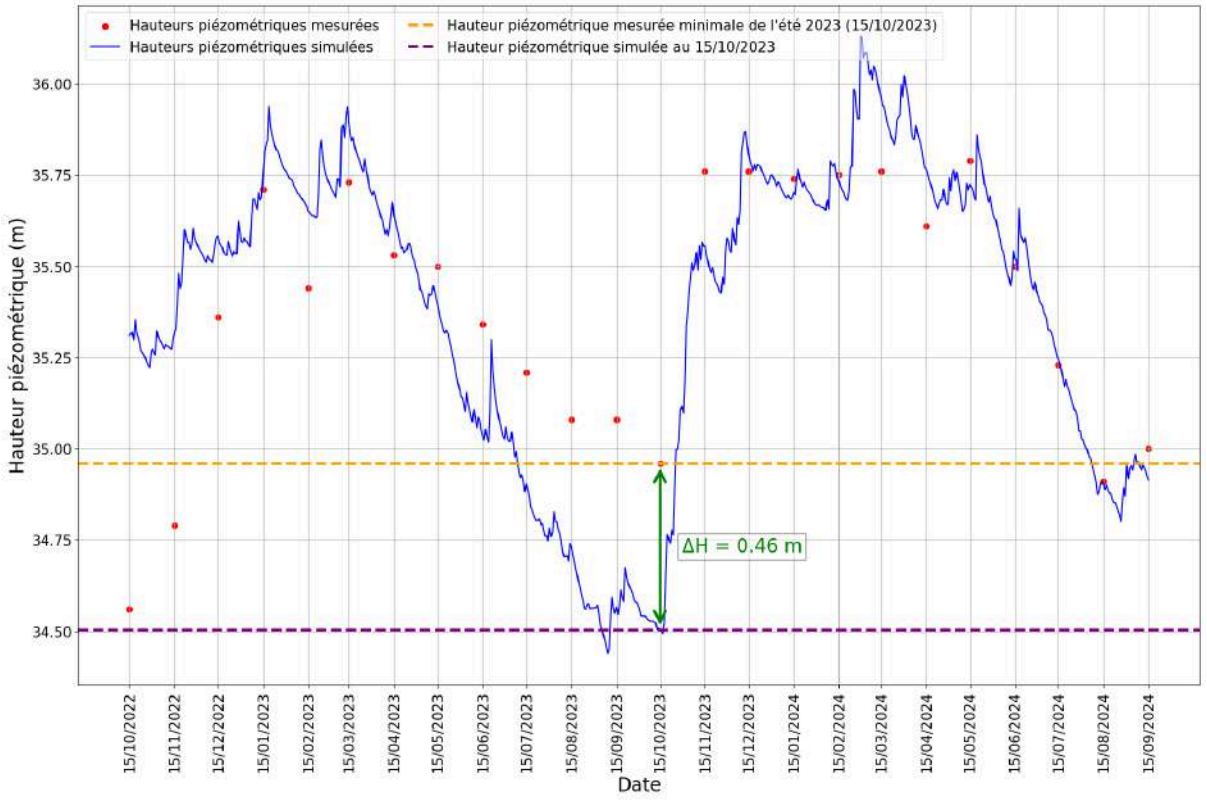

Figure 10 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P5bis

En considérant une porosité de drainage comprise entre 15 et 30%, cette différence de hauteur piézométrique se traduit en une lame d'eau de 69 à 138 mm.

Cette observation au regard de l'été 2023 a pu également être faite au piézomètre P6 comme l'illustre la figure 11 ci-dessous.

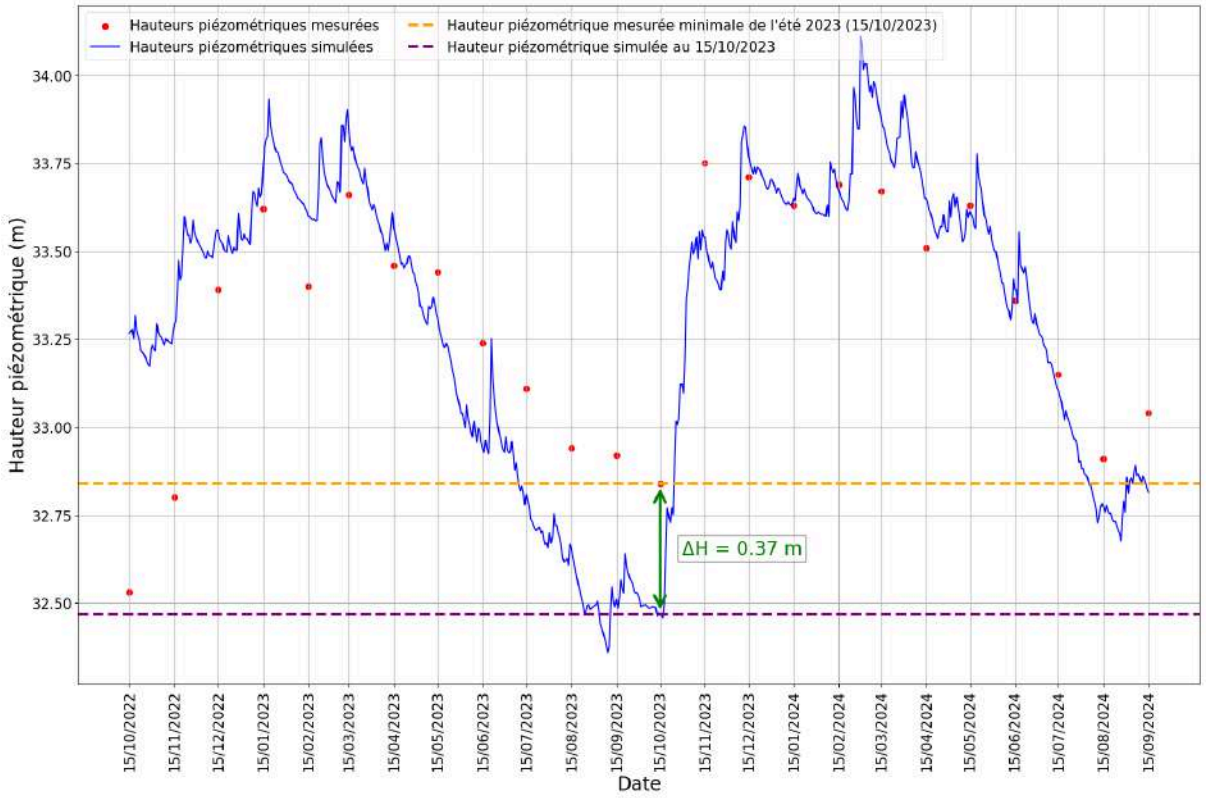

Figure 11 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P6

Sur le piézomètre P6, la lame d'eau pompée dans la nappe par la végétation est estimée entre 55 et 111 mm. Cet ouvrage se trouve à environ 1300 mètres au nord-ouest de P5bis et à environ 500 mètres à l'est de la limite ouest de l'incendie au niveau du centre de Saumos, dans la zone proche du foyer de l'incendie. Les valeurs de la lame d'eau légèrement plus basses pourraient sans doute être l'œuvre des différentes crastes encadrant le piézomètre. Néanmoins, les valeurs obtenues peuvent tout de même être considérées comme étant du même ordre de grandeur que les résultats précédents.

Une différence de hauteur piézométrique encore moins importante peut aussi être observée lors de l'étude du piézomètre P36, dont la figure 12 ci-dessous présente les résultats

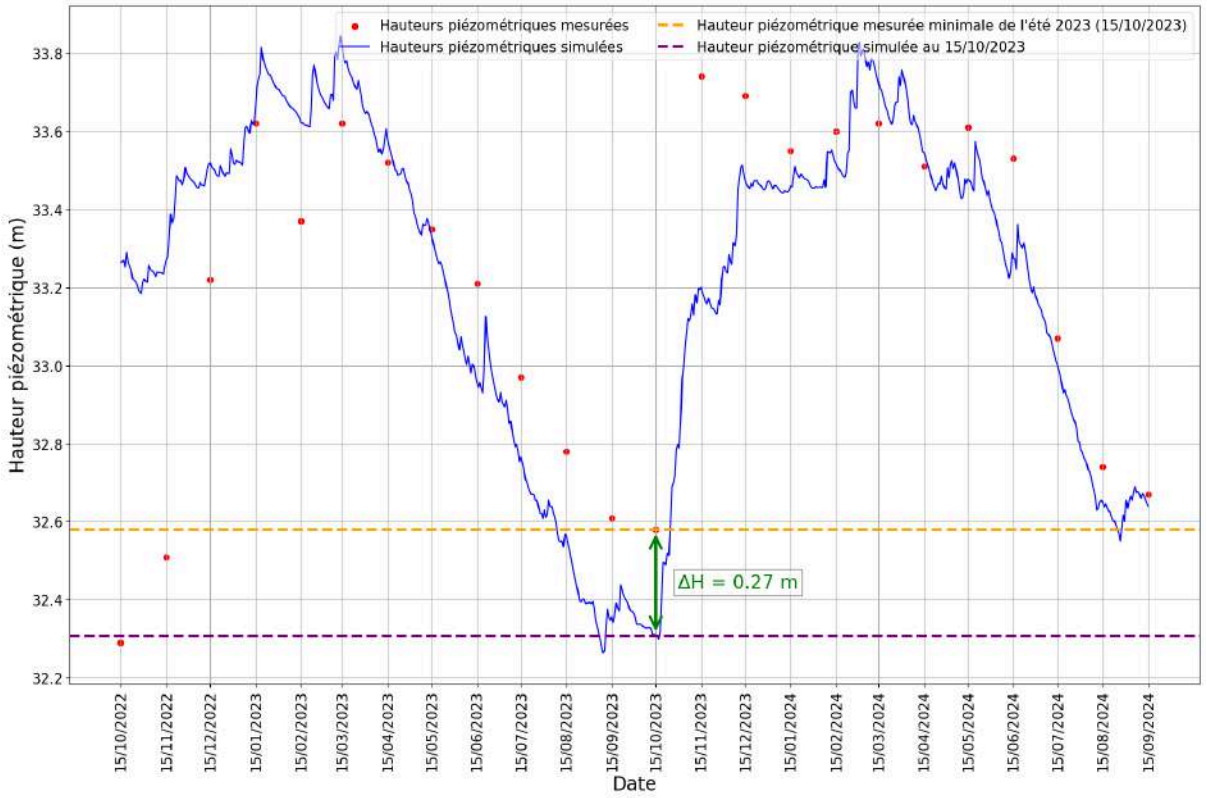

Figure 12 : Mise en lumière de l'eau pompée dans la nappe par la végétation durant les déficits hydriques estivaux au piézomètre P36

Selon ce dernier piézomètre, la lame d'eau habituellement pompée par la végétation semble être comprise entre 40 et 81 mm. Ces valeurs environ 40% plus basses que celles estimées par l'étude du piézomètre P5bis ne semblent pas pouvoir s'expliquer par la présence de la Craste de la Levade au nord du piézomètre, du fait de son éloignement important à hauteur d'un demi-kilomètre. Cette différence est probablement liée à l'emplacement du piézomètre, implanté à environ quatre kilomètres au nord de Saumos et à environ 300 mètres de la limite ouest du périmètre incendié. La piézométrie enregistrée à cet endroit pourrait être alors influencée par la zone épargnée par les flammes ainsi que par la subsistance éventuelle d'un plus grand nombre de racines, continuant alors à pomper légèrement dans la nappe, dans l'hypothèse où l'incendie aurait été moins virulent à cet endroit, en bordure de l'aire sinistrée.

I.6-) Les vecteurs d'incertitude

Après l'analyse des résultats fournis par l'étude des chroniques piézométriques de P6, P36 et P5bis, ce dernier ouvrage semble être confirmé comme celui pouvant fournir les résultats les plus exploitables. Sa position centrale au sein de la zone incendiée et son bon éloignement de crastes importants semble faire de ce point d'observation le plus représentatif du changement d'environnement inhérent à l'incendie. En suivant la réflexion mise en place lors de cette étude, la végétation habituelle de cette zone, composée de pins maritimes et de molinie, semble être contrainte de prélever environ 100 ± 35 mm d'eau dans la nappe, en supplément des faibles quantités d'eau pouvant être interceptées lors des épisodes de précipitations et des volumes insuffisants dans le sol.

Cette estimation est néanmoins affectée par plusieurs possibilités d'incertitudes. La première est directement liée aux résidus observés lors du calage du modèle. En effet, comme le montre à nouveau la figure 13 ci-dessous, le modèle peut engendrer des erreurs pouvant parfois aller jusqu'à 40 cm.

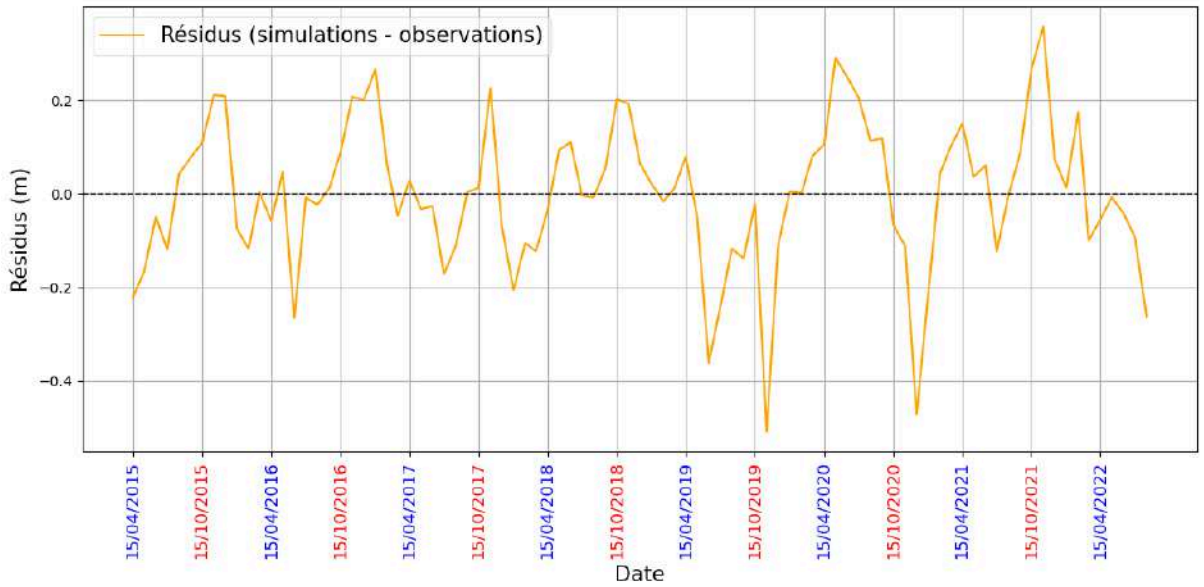

Figure 13 : Résidus observés lors du calage du modèle au piézomètre P5bis

En particulier, malgré une apparence chaotique et aléatoire de la courbe de résidus, une tendance à une surestimation entre 10 et 20 cm peut être décelée à la fin des périodes estivales (15/10), à l'exception de 2019 et 2020 où interviennent des sous-estimations de l'ordre de 10 cm. Ce constat met donc en lumière la grande variabilité du système étudié et de l'incertitude complète planant sur le comportement du modèle sur la période prise comme moment d'intérêt. Dans l'hypothèse où le modèle surestimerait la hauteur piézométrique au 15/10/2023 et en associant l'incertitude relative à la porosité du milieu, la lame d'eau estimée pourrait éventuellement atteindre les 170 mm. Dans la situation inverse d'une sous-estimation de l'ordre de celle de 2019 ou 2020, le résultat final pourrait se limiter à 54 mm.

La deuxième source d'incertitude est en relation directe avec le questionnement fondamental de cette étude, s'intéressant plus particulièrement au pin maritime. Bien que les pins n'aient sans nul doute brûlé en surface lors de cet incendie, aucun élément ne permet d'affirmer avec certitude que les racines de tous les arbres aient été détruites lors des feux. Dans le cas où certaines d'entre elles

auraient subsistées, un pompage dans la nappe a pu persister après l'incendie, faussant ainsi légèrement l'estimation de la lame d'eau captée par les pins dans l'aquifère, dans le sens d'une sous-estimation. En admettant les résultats issus du piézomètre P5bis, situé au cœur de l'incendie, comme les plus fiables, il est nonobstant raisonnable de conjecturer une destruction majoritaire du réseau racinaire.

La dernière source d'erreur identifiée dans cette démarche concerne la nature de la végétation présente sur la parcelle. En effet, malgré une monoculture du pin maritime sur lesdites parcelles, ces arbres ne sont pas les seuls végétaux peuplant ces sols. Avant l'incendie, les arbres d'une quarantaine d'années qui dominaient ces champs abritaient également un sous-bois occupé par la molinie. Cette graminée très compétitive et de nature pyrophile, peut très rapidement reconquérir un environnement de lande humide et constituer ainsi le stade pionnier de la succession écologique secondaire se mettant en place dès la fin de l'incendie. A l'époque des observations faites dans cette partie, un peu plus d'un an après l'incendie, il est tout à fait concevable d'imaginer que la molinie était déjà à nouveau présente sur la zone ; le repeuplement aurait d'ailleurs pu être encore bien plus rapide si des rhizomes avaient survécu aux feux. Avec toutefois une incertitude sur la faculté et/ou le besoin de la molinie de pomper dans l'aquifère durant la période estivale, cette strate herbacée a très bien pu évapotranspirer durant l'été 2023, ajoutant encore une fois une zone d'ombre sur les estimations faites précédemment.

Malgré ces multiples sources d'incertitudes, l'interprétation de cette étude a tout de même permis d'obtenir un résultat relevant du comportement évapotranspiratoire du pin maritime au sein d'un système plus large comprenant la totalité de la végétation. La deuxième partie de ce projet a pour objectif d'utiliser l'estimation de la lame d'eau qui aurait été utilisée par la végétation afin d'estimer le coefficient cultural du pin maritime à l'aide d'un modèle réservoir du sol.

II-) Estimation du coefficient cultural du pin maritime

II.1-) La Forêt des Landes de Gascogne et le pin maritime

La Forêt des Landes de Gascogne fut officiellement plantée sur l'emprise qu'on lui connaît aujourd'hui à partir de 1857 sous l'impulsion de Napoléon III afin d'assécher la région marécageuse se trouvant sur les départements des Landes, de la Gironde et du Lot-et-Garonne et dont l'activité principale était l'élevage de moutons couplé à la culture de céréales. Cette entreprise avait pour objectif de fixer les dunes océanes et d'assainir les sols pour les rendre plus propices au développement des activités humaines. Dès la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, cette forêt d'environ un hectare, peuplée en majorité de pins maritimes (*Pinus pinaster*), était exploitée à des fins économiques avec le gemmage. L'incision des troncs amenait à récolter la résine de pin, pouvant être utilisée pour la fabrication d'essence de térébenthine, de colophane (obtenue par distillation de la térébenthine et utilisée dans la fabrication d'adhésifs), de produits d'entretien (cirage), de peintures, de bougies, ou plus largement dans la préparation de produits chimiques de synthèse, pharmaceutiques ou cosmétiques. De nos jours, cette activité à quasiment disparue et les arbres récoltés dans le cadre de l'activité sylvicole telle qu'on la connaît aujourd'hui fournissent en matières premières l'industrie papetière (pâte à papier, carton), le secteur de la construction et de la menuiserie (bois d'œuvre) et demeurent une source d'énergie de chauffage (bois de chauffage ou production de granulés). Les méthodes de gestion sylvicoles actuelles sont héritées des années 60 – 70, avec de longs cycles d'exploitation des parcelles de trente à cinquante ans, contribuant à une production de bois élevée sur des sols pauvres. Aujourd'hui, ces vastes forêts constituent un patrimoine naturel précieux, à la fois économique pour toute la région du Triangle Landais, mais aussi écologique, en abritant une biodiversité locale et en formant un habitat privilégié pour des espèces animales sauvages, telles que le chevreuil, le sanglier ou le renard et végétales, comme de nombreuses espèces de champignons, la fougère, les ajoncs, les graminées etc.
Le pin maritime (*Pinus pinaster*) est l'arbre emblématique de la Forêt des Landes de Gascogne. Reconnaissable à son tronc élancé recouvert d'une écorce épaisse et fissurée, ainsi qu'à ses longues aiguilles vert foncé, il forme des forêts denses qui dominent le paysage médocain. Le pin maritime est particulièrement bien adapté aux conditions climatiques du Médoc, où les vents marins et les sols sableux initient le développement d'une végétation locale spécifique.

II.2-) Le coefficient cultural

Le coefficient cultural (K_c) est un paramètre utilisé en agronomie et en gestion des ressources en eau pour estimer l'évapotranspiration d'une culture spécifique (ET_c) par rapport à l'évapotranspiration de référence (ET_0) tel que dans l'équation 5.

$$ETP_c = K_c \times ETP_0 \quad (5)$$

avec ETP_c l'évapotranspiration potentielle de la culture ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), K_c le coefficient cultural de la culture (–) et ETP_0 l'évapotranspiration potentielle de référence ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$).
L'évapotranspiration potentielle de référence telle que $K_c = 1$ est basée sur une pelouse de graminées verte et en pleine croissance de 12 cm de hauteur, couvrant complètement le sol et

disposant de la quantité d'eau nécessaire pour subvenir normalement à ses besoins évapotranspiratoires. Cette référence est souvent assimilée à un gazon de cricket anglais, qui dans les premières formulations des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration, était pris comme standard. En agriculture, la connaissance du coefficient cultural permet d'adapter les irrigations en eau en fonction de l'espèce végétale en présence, de son stade de développement et des conditions climatiques locales, afin d'établir des conditions hydriques optimales pour son développement, tout en optimisant l'irrigation afin de préserver les ressources hydriques et éviter le gaspillage d'eau.
Le coefficient cultural d'une parcelle varie tout au long du cycle de croissance des espèces la peuplant. Généralement faible au début du cycle de vie, lorsque la végétation est peu développée, il augmente au fur et à mesure de la croissance, jusqu'à l'atteinte du plein développement, avant de diminuer à maturation ou après la récolte. Après l'étude de la lame d'eau prélevée par les pins maritimes (ou la végétation complète), un modèle conceptuel à réservoir du sol peut être utilisé afin de déterminer le coefficient cultural du pin maritime

II.3-) Modèle conceptuel à réservoir du sol

Le modèle à réservoir est une représentation conceptuelle du fonctionnement hydrique du système sol|végétation. Il se base sur l'image d'un réservoir dont le niveau varie en fonction des flux entrants et sortants, afin de modéliser le stockage et les mouvements des différents volumes d'eau au sein du système, en se basant sur le bilan quantitatif de ces flux, au pas de temps journalier. Le modèle utilisé pour cette étude est SWB (*Soil Water Balance*). Le bilan hydrique réalisé par ce modèle et illustré dans la figure 14 est le suivant :

$$\Delta S = P - T - R - (D + F) = P - T - RU - R$$

avec ΔS la variation de stock ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), P les précipitations ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), T la transpiration par le sol ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), RU le prélèvement racinaire dans la nappe ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), D le drainage ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$), F le drainage rapide ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$) et R la recharge ($\mathrm{mm \cdot j^{-1}}$) telle que $R = D + F$.

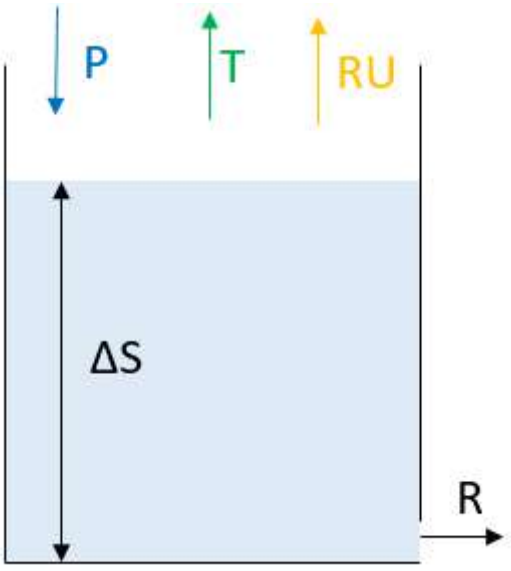

Figure 14 : Bilan hydrique du système sol|végétation réalisé par SWB

Afin d'estimer le coefficient cultural du pin maritime, il est nécessaire de se placer sur la même période du 15/04/2023 au 15/10/2023 nous ayant permis de quantifier l'eau qu'aurait mobilisé les pins, depuis la nappe, pour leur évapotranspiration. La représentation graphique de la chronique de précipitations, mise en parallèle avec les flux journaliers de transpiration et de prélèvement racinaire estimés par SWB, présentée en figure 15, permet d'observer le comportement de la végétation au cours de cette saison estivale – un coefficient cultural de 1 est utilisé pour cette modélisation.

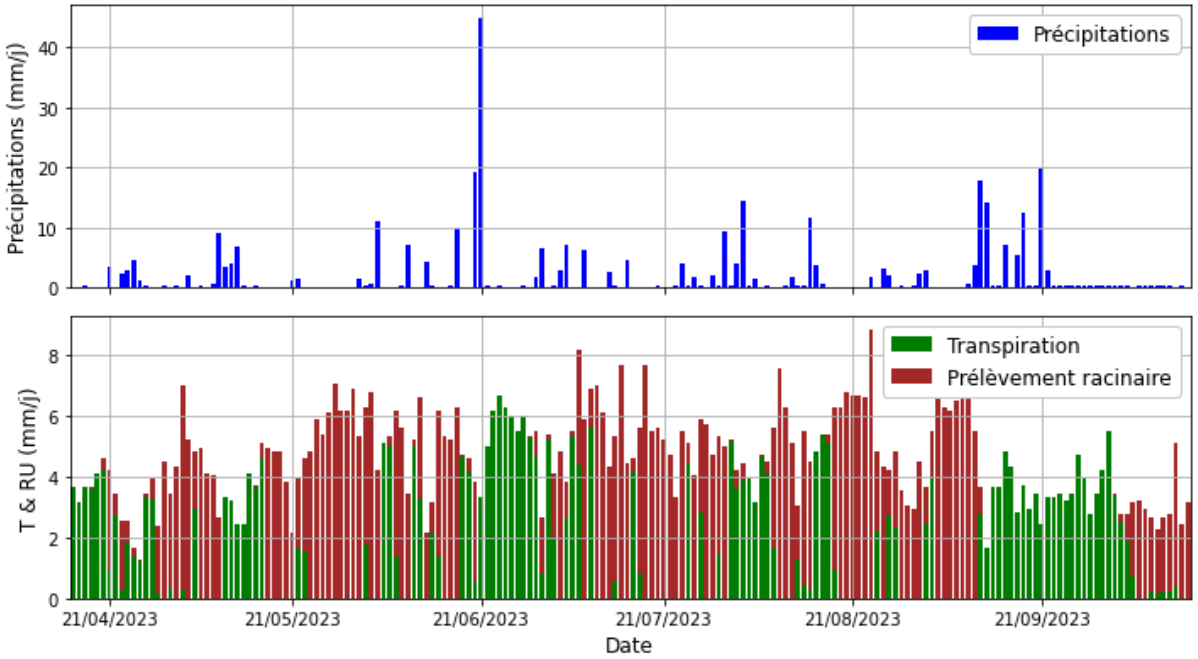

Figure 15 : Chroniques de précipitation et flux de transpiration et de prélèvement racinaire simulés par SWB sur la saison estivale de 2023

Cette modélisation permet de confirmer le fonctionnement hydrique du modèle vis-à-vis de la végétation. Nous observons d'une part des exigences évapotranspiratoires plus importantes au milieu de l'été, lorsque les températures sont maximales et l'humidité au plus bas. D'autre part, les épisodes de précipitations s'ensuivent de plusieurs jours durant lesquels le prélèvement racinaire est nul. En effet, les pluies ayant amenées suffisamment d'eau à la végétation et au sol pour que celle-ci puisse évapotranspirer en utilisant ces apports d'eau uniquement, le prélèvement racinaire en nappe est donc inutile. A l'inverse, lorsque les précipitations se font rares, les volumes d'eau accessibles à la végétation pour évapotranspirer ne sont pas suffisants ou difficilement prélevables, obligeant alors ces derniers à mobiliser l'eau de la nappe, augmentant ainsi le prélèvement racinaire et diminuant le terme de transpiration par le sol. Ces observations font écho à la méthode de calcul du prélèvement racinaire utilisée par SWB, en soustrayant le terme de transpiration au terme d'évapotranspiration potentielle – les végétaux puisent dans la nappe ce qu'ils n'ont pas pu prélever dans le sol. Cette estimation du prélèvement en nappe sous-entend également une complétude immuable des besoins évapotranspiratoires des végétaux ; la disponibilité constante en eau leur permet de tout le temps évapotranspirer à hauteur de l'évapotranspiration potentielle.

Cette modélisation s'intéressant à l'évolution temporelle des termes relevant de l'évapotranspiration, est complétée par une deuxième représentation, présentée en figure 16, présentant l'évolution de ces termes en fonction du coefficient cultural. Pour cela, les valeurs journalières des différents

termes sont sommées sur toute la période d'étude. Les précipitations totales étant une valeur connue et constante, cette modélisation a donc pour vocation d'identifier l'évolution des termes de transpiration et de prélèvement racinaire lors d'une augmentation progressive du coefficient cultural.

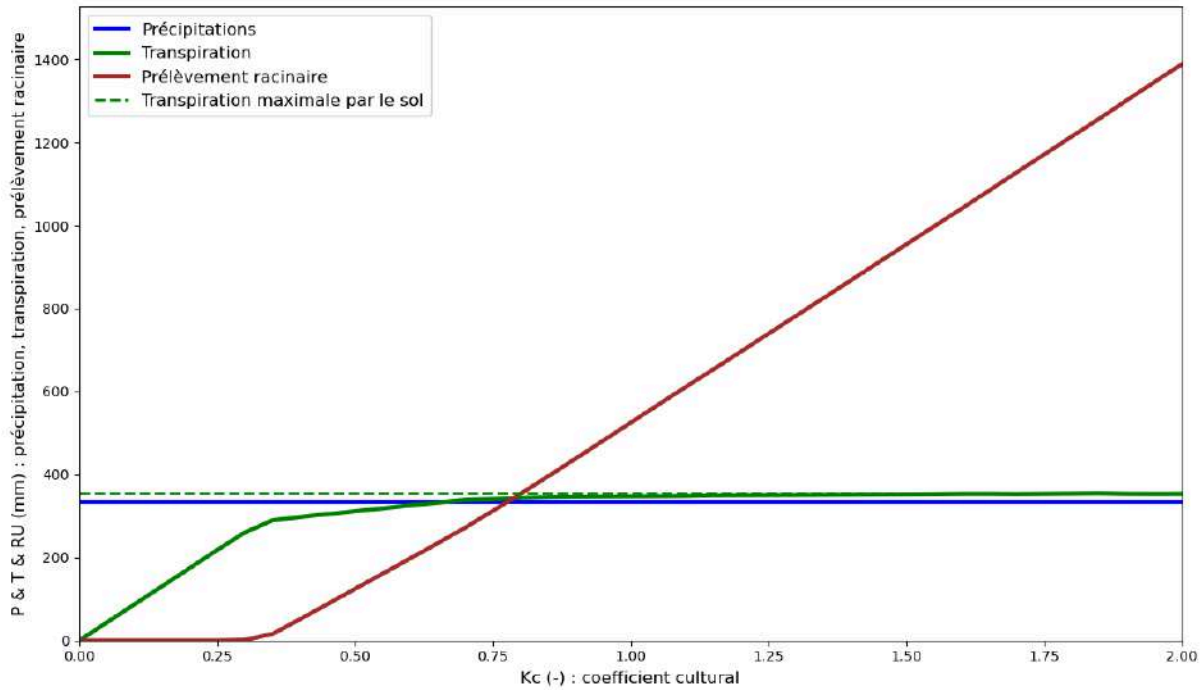

Figure 16 : Evolution du bilan hydrique de SWB en fonction du coefficient cultural (Kc)

Il est observable que pour un coefficient cultural inférieur à 0,3 environ, la transpiration augmente linéairement tandis que le prélèvement racinaire reste nul. Une augmentation de la transpiration avec le coefficient cultural apparaît comme parfaitement logique et un prélèvement racinaire nul à ce stade témoigne bien de faibles demandes évapotranspiratoires associés à de tels coefficients culturaux. A partir de cette valeur seuil de 0,3, le prélèvement racinaire commence à augmenter, participant ainsi à fournir l'eau nécessaire pour l'évapotranspiration de la végétation. Cet apport de la nappe soulage alors la pression exercée sur le sol pour en extraire de l'eau, faisant augmenter plus lentement le terme de transpiration. Une deuxième valeur seuil est observée à un coefficient cultural d'environ 0,75, correspondant au début du déficit hydrique avéré. A partir de ce point, la transpiration du sol n'excède pas les 355 mm et l'augmentation du coefficient cultural se poursuivant n'est prise en charge que par une accentuation du prélèvement racinaire. Le sol ne semble donc pas en mesure de fournir plus de 355 mm d'eau sur la période considérée et tout besoin supplémentaire devra être soutenu par l'eau de la nappe. Sans renseignement sur le stock d'eau disponible dans l'aquifère, le modèle considère une disponibilité permanente, en faisant alors augmenter les prélèvements racinaires profonds pour compléter les quantités d'eau devant être évapotranspirées. Dans le milieu naturel, un accès constant à une ressource en eau n'est pas garanti et dans un scénario où la végétation ne parviendrait pas à subvenir à ses besoins évapotranspiratoires, elle rentrerait alors en stress hydrique.

II.4-) Estimation du coefficient cultural du pin maritime

A la suite des observations faites dans la première partie de cette étude, il est considéré que les pins auraient théoriquement prélevé une lame d'eau de 160 mm durant l'été 2023. Cette valeur s'appuie sur les conclusions tirées de l'étude du piézomètre P5bis et est ajustée à la hausse sur la base, des incertitudes identifiées (dans le sens d'une surestimation des hauteurs piézométriques par le modèle) et d'une valeur de porosité de drainage proche des 30%. Le coefficient cultural correspondant peut donc être estimé grâce à la figure 17 ci-dessous, reprenant les propos illustrés par la figure 16.

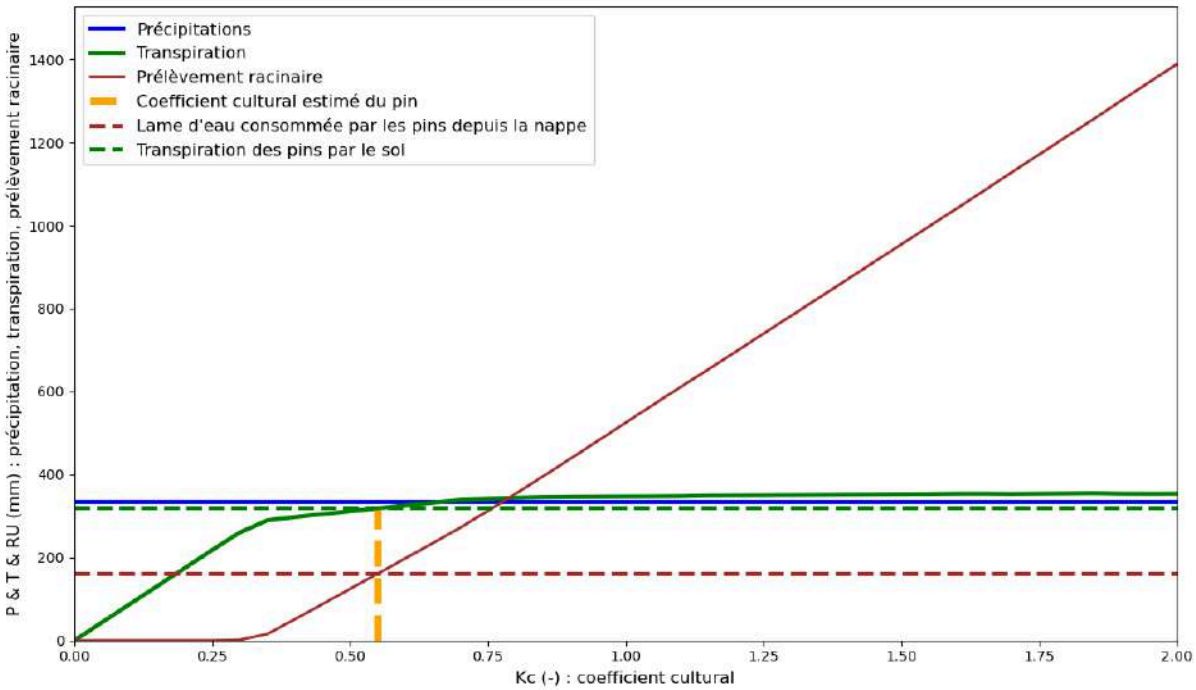

Figure 17 : Estimation graphique du coefficient cultural du pin à partir de l'évolution des termes d'évapotranspiration modélisés par SWB

Cette démarche aboutit à un coefficient cultural estimé de 0,55, pour une transpiration par le sol à hauteur de 318 mm, soit une évapotranspiration totale de 478 mm sur toute la période. Ce résultat apparaît comme bien inférieur à la valeur attendue, proche de 1. Ce résultat étonnant est lié à la comparaison de deux termes ne prenant pas nécessairement en compte les mêmes acteurs d'évapotranspiration.

Comme évoqué précédemment, la lame d'eau estimée pompée dans la nappe par la végétation n'est pas uniquement reliée aux pins maritimes. D'autres espèces telles que la molinie (*Molinia caerulea*) pouvaient être présentes sur la parcelle une année après l'incendie. Le repeuplement de la lande par cette espèce a pu en tout cas être constaté lors d'une visite de terrain le 28 novembre 2024, soit deux ans après le sinistre, comme l'illustre la figure 18. Malgré des incertitudes sur la réalité d'un prélèvement d'eau de cette espèce herbacée dans la nappe, la contribution d'autres espèces végétales venant fausser l'estimation ne peut pas être exclue. Dans cette configuration, une interrogation se présente quant à la quantité d'eau que serait amené à prélever un peuplement de molinie. Malgré cela, il peut être conjecturable de considérer les prélèvements au sein de la nappe comme majoritairement initiés par les pins.

Figure 18 : Peuplement de molinies deux ans après l'incendie

Cette conjonction possible entre les agissements des pins ou de la molinie, se traduisant par une unique réponse sous la forme d'une différence de hauteur piézométrique alors difficilement interprétable, se retrouve de la même façon dans la manière dont SWB réalise les calculs. En effet, ce modèle considère un coefficient cultural unique en paramètre d'entrée, englobant l'ensemble de la végétation de la parcelle et pas seulement les pins. Sous l'hypothèse d'un prélèvement dans la nappe uniquement à destination des pins, la valeur de lame d'eau estimée précédemment ne prend donc pas en compte le couvert végétal (vraisemblablement de molinies).

A la lumière de ces éléments, la recherche s'oriente donc sur la quantification des besoins évapotranspiratoires de la molinie. Deux références bibliographiques ont été identifiées comme traitant de l'évapotranspiration d'une végétation de lande humide composée de pins et de molinies. Un premier rapport d'expériences réalisées dans une chambre de transpiration afin d'estimer l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie, fait état d'une évapotranspiration minimale du sous-étage correspondant à 30% de la transpiration effective des pins durant l'été 1988 et 1989 – avec des mesures atteignant les 50% voire 300% (Loustau et al., 1991). Une deuxième étude s'intéressant à l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois en utilisant la méthode du débit de sève et du bilan d'énergie-fluctuations, mentionne la part très importante que représente la molinie dans l'évapotranspiration totale, estimée ici entre 45 et 54% de l'évapotranspiration totale, lors de mesure durant l'été 1989 (Berbigier et al., 1990).

Le coefficient cultural étant pour l'instant sous-estimé, il est admis par la suite que la molinie représente 54% de l'évapotranspiration totale de toute la parcelle – les pins en représentent donc 46%. Ce choix est également motivé par le fonctionnement du modèle SWB, considérant une disponibilité en eau illimitée et empêchant le système de rentrer en stress hydrique – les évapotranspirations potentielles sont tout le temps satisfaites – participant à l'obtention de flux de prélèvement racinaire non-contraints et de ce fait à la sous-estimation du coefficient cultural.
En suivant l'hypothèse d'un prélèvement racinaire en nappe largement dominé par les pins, les valeurs correspondantes sont donc recalculées individuellement en soustrayant la part d'évapotranspiration potentielle correspondant aux pins (46% du total) à la part de transpiration admise pour les pins (étant donné que 54% de l'eau transpirée provient de la molinie). Une fonction "objectif" prenant en argument le coefficient cultural et faisant la différence entre le prélèvement racinaire calculé par SWB et la valeur cible (160 mm) est créée. Une optimisation par la méthode de Brent permet de faire varier le coefficient cultural en entrée de la fonction objectif jusqu'à ce que la condition (ici une différence nulle) soit satisfaite. Cette résolution aboutit à une valeur de coefficient cultural adéquate égale à 0,79.

Malgré l'amélioration substantielle du résultat, celui-ci reste bien en dessous de la valeur attendue. Un coefficient cultural comme celui-ci pourrait être un témoignage de l'adaptabilité du pin en milieu sec, se manifestant par des mécanismes de réduction de la transpiration en période de stress hydrique, non pris en compte dans le modèle SWB. De plus, la lame d'eau estimée en première partie de cette étude demeure très incertaine et sa représentativité pour une étude traitant du pin maritime uniquement est réfutable. La différence de hauteur piézométrique entre le modèle et les mesures est vraisemblablement bien liée à l'incendie, mais son interprétation reste difficile. En effet, une telle valeur est le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs dont l'existence et l'ampleur sont mal connues. Dans le cadre de ce projet, une déconvolution permettant de clairement identifier les influences des différents processus et de séparer les pins, du couvert végétal, et les différents prélèvements semble irréalisable. La nature du résultat obtenu lors de l'observation de l'effet de l'incendie sur la piézométrie de la nappe n'est pas directement comparable au(x) résultat(s) issu(s) du modèle réservoir du sol SWB. Enfin, des incertitudes indéfectibles intrinsèques à l'environnement, telles que la géologie hétérogène du milieu ou la présence d'alios, peuvent faire varier localement les différents paramètres hydrologiques (comme la porosité) ou être à l'origine de singularités (comme l'impossibilité pour les racines de traverser une couche d'alios) ne pouvant pas être prises en compte.

Conclusion

L'étude réalisée dans le cadre de ce projet de fin d'étude a permis de montrer l'impact de l'incendie de septembre 2022 dans le Sud-Médoc sur la piézométrie de la nappe superficielle du Plio-Quaternaire. Ces feux de forêt et la destruction de la végétation en surface qui en découle ont eu pour effet une réduction de l'évapotranspiration et par extension des prélèvements racinaires dans la nappe phréatique, consécutive à la disparition de la végétation. L'utilisation d'un modèle a permis de mettre en exergue une différence de hauteur piézométrique équivalente à une lame d'eau de l'ordre de 100 mm entre les mesures post-incendie et la simulation, au terme de l'été 2023. Cet écart fut interprété comme la quantité d'eau que la végétation, et en majeure partie les pins, aurait mobilisé dans des conditions non-perturbées pour subvenir aux besoins évapotranspiratoires estivaux.
Malgré de nombreuses incertitudes sur le bien-fondé du résultat, cette information fut par la suite mise à profit afin d'estimer le coefficient cultural du pin à l'aide d'un modèle réservoir du sol. Après avoir étudié le fonctionnement de celui-ci et mis en évidence la difficulté de traiter les résultats de ce modèle avec les conclusions précédentes, une recherche bibliographique permit d'apprécier la part importante du sous-bois à molinies dans le comportement évapotranspiratoire général de la parcelle. Après de nombreuses tentatives de correction et de prise en compte de certaines incertitudes, les investigations ont finalement abouti à un coefficient cultural estimé à 0,79, une valeur apparaissant relativement faible, malgré une démarche de recherche orientée vers une maximisation de ce résultat.

Bien que pouvant refléter les stratégies adaptatives des pins maritimes pour limiter leur consommation d'eau en période de stress hydrique, ce résultat met en lumière les grandes incertitudes entourant la résolution de ce problème. Les données et méthodes appuyant la réflexion suivie lors de ce projet n'ont pas permis de répondre précisément aux questionnements initiaux. La méconnaissance et la variabilité de certains paramètres ainsi que les différents acteurs et processus intervenant dans les phénomènes étudiés rendent l'interprétation et l'utilisation des résultats apportés par l'incendie difficiles.
Cette étude montre l'importance de considérer le fonctionnement d'un hydrosystème dans son ensemble et la difficulté résidant dans la prise en compte de la totalité des processus et des incertitudes associées. Les interactions entre un environnement peuplé par un certain ensemble de végétation et les eaux souterraines sont complexes et les informations pouvant être obtenues par des mesures piézométriques ne suffisent pas pour identifier clairement le rôle des différents acteurs dans l'obtention d'un unique signal final. Des données supplémentaires sur les caractéristiques de la nappe ou sur le repeuplement de la parcelle, ainsi qu'une recherche plus approfondie d'une nouvelle méthode de résolution du problème en utilisant les possibilités offertes par l'incendie permettraient peut-être d'approfondir ce travail et d'aboutir à des résultats plus satisfaisants.
Au-delà de la perspective de recherche, ce travail a tout de même montré la grande importance que pouvait avoir un événement tel que ces incendies sur une ressource en eau essentielle pour la végétation, et en particulier dans le Triangle Landais pour l'activité sylvicole. Dans le contexte actuel d'inquiétude vis-à-vis du changement climatique et de la disponibilité en eau, ce genre de projet souligne l'importance d'intégrer les dynamiques environnementales dans la gestion hydrologique, mais aussi forestière. L'étude de ces milieux naturels dans ces circonstances peut également avoir une portée didactique, en apportant des éléments de réflexion utiles, pour l'élaboration de stratégies

de gestion durable des aquifères, et la prévention liée aux risques d'incendies de forêt, voués à se multiplier dans les années à venir.

Bibliographie

M. Koller, A. Pryet, B. de Grissac, A. Dupuy. *Étude de l'influence du drainage sur le bilan d'une nappe phréatique - Application à la nappe du Plio-Quaternaire sous le massif forestier en Gironde - Approche théorique et modélisation d'un site expérimental*. SMEGREG EPTB Nappes Profondes de Gironde, Bordeaux INP - ENSEGID, 2018.

J. Peragallo. *Monographie sur l'eau, la forêt, et les crastes du bassin versant de l'Eyron*. 2020.

P. Legigan. *L'élaboration de la formation du sable des Landes, dépôt résiduel de l'environnement sédimentaire Pliocène-Pléistocène centre aquitain*. Mémoires de l'Institut de géologie du bassin d'Aquitaine, VI-429 p, ref : 49 p. Illustration Thesis number no 642, 1979.

F. Vernier, A. Castro. *Critère "Préservation de l'environnement", sous-critère "Eau", Rapport d'expert dans le cadre de l'expertise sur l'avenir du massif forestier des Landes de Gascogne*. GIP ECOFOR, Bordeaux, France, pp 39, 2010.

M.R. Bakker, L. Augusto, D.L. Achat. *Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (Pinus pinaster) on dry and humid sites*. Plant Soil, 286, pp 37-51, 2006.

D. Loustau, H. Cochard, M. Sartore, M. Guédon. *Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (Molinia coerulea (L) Moench)*. Annales des sciences forestières, 1991, 48 (1), pp.29-45. hal-00882735.

P. Berbigier. *Étude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois*. Ann Sci For, 22, pp 157-177, 1990.