Etude CarbonPar

Stocks et séquestration de carbone sur trois parcours de golf en France

Résumé

Le carbone organique du sol (COS) a été étudié sur trois parcours de golf en France : le Mérignies Golf & Country Club près de Lille dans le Nord de la France, le Golf Bluegreen Bordeaux-Lac dans le Sud-Ouest, et le Golf National à Paris.

Entre 65 et 70 carottes de sol, allant jusqu'à 100 cm de profondeur, ont été prélevées sur chaque site. Le COS et la densité apparente ont été analysés sur trois couches de profondeur : 0-30, 30-60 et 60-100 cm.

Le carbone dans la biomasse aérienne a été estimé pour le Golf National en comparant deux méthodes de télédétection : une série temporelle satellite de 2019 à 2023 et un LiDAR de 2022.

Le stock de COS était de 6 900 tonnes (t) à Mérignies et de 8 730 t pour Bordeaux-Lac. Au Golf National, le stock total de carbone était de 9 037 t, comprenant 8 149 t de COS et 888 t de C dans la biomasse aérienne.

Une perturbation importante du sol liée à la construction a restreint les analyses comparatives au-delà de 30 cm de profondeur. Une comparaison des stocks moyens de COS dans les 30 premiers centimètres des sols de gazon entretenu avec ceux des terres cultivées et des prairies dans les régions pertinentes de France suggère que le COS des gazons de golf augmente avec l'âge. À Bordeaux-Lac, le stock de COS du parcours de La Jalle, vieux de 45 ans, était légèrement inférieur à celui des prairies de la région.

La forte variabilité observée du COS suggère que les plans d'échantillonnage ont réussi à capturer les nuances du COS des parcours de golf. De plus, cela souligne la nécessité de recherches complémentaires, ainsi que le potentiel d'amélioration, en lien avec le projet "4 pour 1000" de la France.

La répartition en profondeur est analysée en fonction des niveaux de perturbation du sol dus aux travaux de construction et à la conservation de la couche arable. Des lignes directrices pratiques sont proposées pour aider les propriétaires, gestionnaires et développeurs de parcours de golf, incluant des recommandations pour améliorer la gestion et le suivi des gaz à effet de serre.

Table des matières

Stocks de carbone et séquestration sur trois sites de parcours de golf en France - Rapport préliminaire, Version 0.2.

© 2022-2024 Carbon Par ehf., une société à responsabilité limitée enregistrée en Islande, n° 580102-2120.

Email de contact : edwin@carbonpar.com

Remerciements 9

À propos de ce document 11

Notation et conversion 13

Introduction 15

Pertinence, transférabilité et impact 22

Travaux et connaissances actuels 24

Objectifs du projet 21

Sélection des sites 34

Méthodes et chronologie 36

Mérignies Golf & Country Club 39

Golf Bluegreen Bordeaux-Lac 61

Le Golf National 91

Échantillonnage du sol 141

Analyse en laboratoire, résultats et autres données 151

Discussion des résultats du carbone organique du sol 174

Biomasse aérienne au Golf National 181

Discussion 211

Recommandations 213

Conclusions
..... 233
Limitations et recherches futures
..... 235
Annexe 1 : Résultats des tests de laboratoire des échantillons de sol
..... 239
Annexe 2 : Plans d'échantillonnage du sol
..... 255
Annexe 3.1 : Photographies aériennes historiques de Mérignies
..... 263
Annexe 3.2 : Photographies aériennes historiques de Bordeaux-Lac
..... 305
Annexe 3.3 : Photographies aériennes historiques du Golf National
..... 377
Annexe 4 : Chapitre de discussion précédent en français
..... 417

Remerciements

Jenny Baird ; Haukur Birgisson ; Rose Boyko ; Hubert Chesneau ; Ezra Chesor ; Remy Dorbeau ; Benoit Falgayrac ; Beatrice Gaulier ; Brynjar Geirsson ; Philippe Gourdain ; Jón Guðmundsson ; Aurélien Hochart ; Harry Kamillaris ; Nina King-Gillies ; Ilias Kynany ; Arthur Lecomte ; Basile Lenoir ; Mathurin Leroux ; Andy Lindsay ; Gillian MacKinnon ; Ian MacMillan ; Jean-Louis Martin Le Chene ; Laurent Mignot ; Lucas Pierre ; Alejandro Reyes ; María Svavarsdóttir ; Emmanuel Veillas ; Laurence Vigneau ; Sylvianne Villaudiere ; Keri Xu ; Amandine Lucchin

À propos de ce document

Contexte

Ce rapport est le fruit d'un partenariat entre Carbon Par et le Fonds de dotation FFGreen, en collaboration avec le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), autour d'une étude carbone sur trois parcours de golf en France, axée principalement sur le carbone organique du sol dans les zones de gazon entretenu. La communication a commencé en 2021, la conception préliminaire du projet et la signature du contrat ont eu lieu en 2022, des échantillons de sol ont été collectés et analysés en 2023, et le projet s'est conclu par l'analyse des données, l'estimation de la biomasse aérienne pour le Golf National et le reporting en 2024.

Conception

Bien que ce document soit conçu sous forme de rapport imprimé traditionnel, il n'est pas destiné à être imprimé. L'orientation paysage est prévue pour encourager et faciliter la visualisation numérique et le partage de diapositives de présentation. Le choix de deux colonnes de texte et leur largeur, avec un maximum d'environ 75 caractères par ligne, est conçu pour minimiser la fatigue du lecteur.

Hyperliens et QR-codes

En consultant la version numérique, divers fichiers associés sont accessibles via des liens hypertexte ou des QR codes. Si vous lisez une version imprimée, vous pouvez accéder à la version numérique du rapport et aux fichiers associés en scannant les QR codes. Nous vous invitons à prendre en compte les objectifs climatiques du projet avant d'imprimer ou de conserver des copies des fichiers numériques partagés.

Historique des versions

Ce rapport préliminaire, version 0.1, est destiné uniquement à la révision. Les versions préliminaires ou les brouillons suivants seront numérotés par incréments de 0.1, c'est-à-dire 0.2, 0.3, *etc*. Une version finale convenue sera la version 1.0. Les mises à jour mineures seront numérotées par la suite par incréments de 0.1, c'est-à-dire 1.1, 1.2, *etc*. Si nécessaire ou pertinent, les versions significativement mises à jour ou modifiées seront numérotées 2.0, 3.0, *etc*.

Notation et conversion

Pour maximiser la familiarité des lecteurs qui ne sont pas activement engagés dans des travaux scientifiques ou académiques, le carbone (C) et le carbone organique du sol (COS) sont exprimés en tonne par hectare (t/ha) et en tonne par hectare par an (t/ha/an) plutôt que dans la notation scientifique traditionnelle, Mg/ha^-1/an^-1, pour les mégagrammes.
Il est important de noter la différence entre le carbone (C) et le dioxyde de carbone (CO_2). La séquestration du carbone est généralement rapportée en C et les émissions de gaz à effet de serre en CO_2 et en équivalents de CO_2 (CO_2e ou CO_2-e). Pour convertir C en CO_2, il suffit de multiplier la valeur du carbone par 3,67, et *vice versa* en divisant.

Tonnes et mégagrammes

Conversion du carbone et du CO_2

Les valeurs numériques sont en notation anglaise. Les décimales sont indiquées par un point (.) et les milliers sont séparés par une virgule (,). Par exemple, une valeur de mille et demi est écrite comme 1 000,5.

Introduction
L'action climatique implique de minimiser les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de maximiser la séquestration du carbone, par exemple dans la biomasse aérienne et le carbone organique du sol (COS), grâce à la photosynthèse dans les plantes.

Tout comme les arbres, le gazon peut séquestrer le carbone. De plus, le gazon entretenu peut séquestrer plus de carbone que les prairies non gérées (Bandaranayake et al., 2003). Le gazon représente généralement environ la moitié de la superficie totale d'un parcours de golf. L'autre moitié est composée principalement d'espaces naturels ou semi-naturels.

En 2019, Carbon Par a été fondé en Islande, autour de son premier projet de recherche scientifique éponyme sur les émissions liées à l'utilisation des terres et la séquestration du carbone sur l'ensemble des soixante parcours de golf islandais. L'étude a été partiellement inspirée par la capacité des sols volcaniques d'Islande à séquestrer le carbone.

Bien qu'ils puissent offrir certains bénéfices dans ce contexte, ils ont aussi souvent été associés à des catastrophes. En 1783, l'éruption du volcan Laki a failli décimer la population islandaise. Le brouillard volcanique qui s'en est suivi a enveloppé une grande partie de l'Europe, aggravant des conditions déjà difficiles et contribuant aux tensions qui ont précédé la Révolution française.

Jusqu'à son apogée, Versailles, berceau de la cour et du gouvernement français, était devenu un véritable musée vivant de l'architecture et des paysages. En ce sens, il a joué un rôle déterminant dans l'émergence des pelouses impeccables comme symbole de statut (Harari, 2015). Bien que la Révolution ait démantelé le Grand Parc de Versailles en vendant des terres à de nouveaux propriétaires, le concept de la pelouse en tant que luxe n'a jamais disparu. Depuis lors, il est resté associé au golf et à d'autres sports pratiqués sur gazon.

« **L'idée de cultiver une pelouse à l'entrée des résidences privées et des bâtiments publics est née dans les châteaux des aristocrates français et anglais à la fin du Moyen Âge.** »

- Yuval Noah Harari

Dans son livre *Homo Deus*, Yuval Noah Harari écrit :
« L'idée de cultiver une pelouse à l'entrée des résidences privées et des bâtiments publics est née dans les châteaux des aristocrates français et anglais à la fin du Moyen Âge. À l'époque moderne, cette habitude a pris de profondes racines et est devenue la marque de fabrique de la noblesse.
Des pelouses bien entretenues exigeaient des terres et beaucoup de travail, en particulier à une époque où il n'y avait ni tondeuses à gazon ni arroseurs automatiques. En contrepartie, elles ne produisent rien de valeur. On ne peut même pas y faire paître des animaux, car ils mangeraient et piétineraient l'herbe. Les pauvres paysans ne pouvaient se permettre de gaspiller des terres ou du temps précieux sur des pelouses.
Le gazon soigné à l'entrée des châteaux était donc un symbole de statut que personne ne pouvait imiter. Il proclamait audacieusement à chaque passant : « Je suis si riche et puissant, et j'ai tant d'acres et de serfs, que je peux me permettre cette extravagance verte. » Plus la pelouse était grande et bien entretenue, plus la dynastie était puissante. Si vous veniez rendre visite à un duc et que vous constatiez que sa pelouse était en mauvais état, vous saviez qu'il était en difficulté.
Ainsi, les humains en sont venus à associer les pelouses au pouvoir politique, au statut social et à la richesse économique. Pourtant, lorsque la Révolution industrielle a élargi la classe moyenne et a donné naissance à la tondeuse à gazon puis à l'arroseur automatique, des millions de familles ont soudainement pu se permettre une pelouse chez elles. Dans les banlieues américaines, une pelouse impeccable est passée du luxe réservé aux riches à une nécessité pour la classe moyenne.
... Les gens du monde entier associent les pelouses au pouvoir, à l'argent et au prestige. La pelouse s'est donc répandue dans le monde entier et est maintenant prête à conquérir même le cœur du monde musulman. Le nouveau Musée d'art islamique du Qatar est flanqué de magnifiques pelouses qui rappellent beaucoup plus le Versailles de Louis XIV que Bagdad de Haroun al-Rachid. »

« L'important dans la vie n'est pas le triomphe, mais la lutte ; l'essentiel n'est pas d'avoir conquis, mais d'avoir bien combattu. »

- Pierre de Coubertin

Tout comme le brouillard de Laki a dévasté l'Europe à la fin du XVIIIe siècle, l'urgence climatique moins visible menace désormais de compromettre la qualité de vie sur Terre. En décembre 2015, à la veille du retour du jeu ancien du golf aux Jeux Olympiques, le monde s'est uni pour signer l'Accord de Paris, s'engageant à limiter le réchauffement climatique à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels.
Parallèlement, la France a lancé l'initiative 4 pour 1000, visant à augmenter annuellement le carbone organique du sol de 0,4 %, marquant une étape critique dans notre course collective vers le zéro net.
Le monde revenu à Paris pour les Jeux Olympiques de 2024, a trouvé un lieu, autrefois partie du Grand Parc de Versailles, qui combine aujourd'hui compétition sportive et action climatique urgente et opportune, nécessitant une lutte collective dans l'esprit olympique.

Pierre de Coubertin, cofondateur du Comité international olympique, visionnaire des Jeux Olympiques modernes, est célèbre pour cette citation : « L'important dans la vie n'est pas le triomphe, mais la lutte ; l'essentiel n'est pas d'avoir conquis, mais d'avoir bien combattu. » Dans la lutte contre le changement climatique, si chacun se bat bien, tout le monde peut gagner, y compris la pelouse.

« Les gens du monde entier associent les pelouses au pouvoir, à l'argent et au prestige. La pelouse s'est donc répandue dans le monde entier et est maintenant prête à conquérir même le cœur du monde musulman. Le nouveau Musée d'art islamique du Qatar est flanqué de magnifiques pelouses qui rappellent beaucoup plus le Versailles de Louis XIV que Bagdad de Haroun al-Rachid. »

- Yuval Noah Harari, *Homo Deus*

Pertinence, transférabilité et impact

En général, les fairways et les zones de rough entretenues se distinguent des autres surfaces engazonnées. Sur la majorité des parcours, ces zones sont tondues si fréquemment que les résidus d'herbe, à peine visibles, sont laissés sur place et réintégrés dans le couvert végétal. Ces résidus se décomposent ensuite pour enrichir le sol en matière organique. Selon Wang et al. (2022), l'impact de ce retour des tontes sur le COS varie de marginal à significatif. Ce procédé peut donc être considéré comme un moyen potentiel de réduire l'apport en engrais.

Un moment décisif se profile à l'horizon, où les gazons de parcours de golf et d'autres pelouses deviennent scientifiquement comparables. La récente transition vers des tondeuses électriques, incluant de petites tondeuses autonomes, offre la possibilité de les alimenter avec de l'énergie renouvelable via de petites éoliennes ou des panneaux solaires. Cette innovation pourrait réduire les émissions liées à l'entretien des pelouses à un niveau marginal, maximisant ainsi la séquestration nette de carbone. La fréquence de tonte, essentielle dans l'entretien des parcours de golf, est également primordiale pour optimiser l'efficacité des tondeuses robotiques.

Dans ce contexte, les connaissances issues de ce projet pourraient être partagées avec les propriétaires et gestionnaires de nombreuses autres zones engazonnées, comme d'autres terrains de sport, des jardins privés et publics, des accotements routiers, des terre-pleins autoroutiers et des espaces verts d'aéroports. Cela pourrait également contribuer à éclairer l'utilisation des gazons et pelouses comme matériaux d'aménagement dans la planification urbaine, l'architecture et le génie civil.

Travaux et connaissances actuels

Wang et al. (2022) ont mené une revue pour synthétiser l'état actuel des connaissances sur la dynamique du carbone dans les sols des parcours de golf. Ils ont constaté que, bien que le gazon des parcours de golf ait le potentiel d'agir comme un puits de carbone significatif, la capacité réelle de séquestration du carbone est très variable et dépend de nombreux facteurs. Ces facteurs incluent les pratiques de gestion (par exemple, la tonte, la fertilisation, l'irrigation), le type d'espèce de gazon, le type de sol et l'utilisation historique des terres du site de golf.
La revue a révélé que les études documentées sur la séquestration du carbone dans les fairways et les zones de rough entretenues, les plus grandes et donc les plus significatives zones de gazon, étaient limitées aux 15 cm supérieurs du sol en Australie et dans quatre États américains, et a mis en évidence un besoin de recherches plus complètes et à long terme pour mieux comprendre et optimiser le potentiel de séquestration du carbone des parcours de golf.
Les quatre études mentionnées ont rapporté un taux de séquestration annuel compris entre 0,22 et 3,55 t/ha. Dans ces études, il a été observé que les systèmes de gazon séquestrent le carbone au cours de leurs premières décennies, atteignant finalement un point de saturation ou d'équilibre.

Parallèles avec le pâturage

Depuis des millénaires, les graminées ont évolué en coexistence avec les animaux de pâturage. Une étude de Þórhallsdóttir et Guðmundsson (2023) a observé une absorption du CO_2 et un COS améliorés dans les zones pâturées par rapport à celles qui ne l'étaient pas. De plus, lorsque le pâturage a été arrêté, la productivité, l'absorption de CO_2 et la teneur en COS du sol ont diminué. En d'autres termes, le COS a diminué lorsque le pâturage a cessé.
Cela suggère que mimer le pâturage par la tonte peut encourager la séquestration du carbone et que la conversion des parcours de golf à d'autres utilisations des terres peut entraîner une diminution des stocks de carbone organique du sol, ce qui signifie que le carbone ou les équivalents de CO_2 sont libérés dans l'atmosphère.
Les graminées semblent avoir été naturellement sélectionnées pour être pâturées, et que le pâturage ou la tonte peut faire passer leur écosystème à un niveau supérieur, où elles produisent et livrent davantage.

Couverture internationale par Carbon Par et ses partenaires

Tableau 2 (Page 26) : Projets de recherche sur le carbone des sols des parcours de golf de Carbon Par en cours de collecte et d'analyse.

Depuis le début de ses activités en 2019, Carbon Par et ses partenaires ont mesuré le carbone organique du sol sur 73 parcours de golf, dans 65 sites, dans trois pays, prenant ainsi un rôle de leader mondial dans la recherche sur le carbone des sols des parcours de golf en :

1. réalisant une étude à grande échelle des 30 cm supérieurs du sol sur tous les soixante sites de parcours de golf de l'Union de golf d'Islande, en partenariat avec l'Université Agricole d'Islande (AUI) et avec le financement de la Fondation scandinave pour la recherche sur le gazon et l'environnement (STERF).
2. s'associant au Scotland's Rural College (SRUC) en 2022 pour entreprendre une étude plus approfondie de l'Elmwood Golf à Fife, en Écosse, avec la collecte d'échantillons de sol jusqu'à 100 cm et des analyses en laboratoire par dix couches de profondeur de 10 cm, pour la densité apparente, la texture du sol, les nutriments, *etc*.
3. s'appuyant sur des discussions entamées en 2021 pour se lancer dans cette étude rapportée, en partenariat avec le fonds de dotation FFGreen et en collaboration avec le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) en France.
   Les trois projets devraient aboutir à un premier rapport et à une publication en 2024. Les rapports des projets islandais et français sont rédigés en parallèle. Aux côtés de l'Islande, la France mène l'initiative nationale de recherche sur le carbone des parcours de golf la plus significative à ce jour.

Cartes de Meersmans et al. (2012) (Page 28)

Meersmans et al. (2012) ont produit une carte haute résolution du carbone organique du sol (COS) en France et ont identifié la combinaison de l'utilisation des terres et des précipitations comme le facteur le plus important expliquant la variabilité du COS.

Carbone organique du sol en France. (Page 30)

La carte de Meersmans et al. (2012) montre bien qu'il y a beaucoup plus de facteurs en jeu que la latitude et la durée de la saison de croissance en ce qui concerne la capacité des terres à séquestrer le carbone dans le sol.

Objectifs

L'objectif principal est d'encourager et de faciliter l'action climatique dans le golf français. Deuxièmement, il s'agit d'inspirer les propriétaires et les gestionnaires de parcours de golf à reconnaître l'opportunité unique qu'ils ont d'exploiter leurs terres pour la séquestration du carbone, réduisant ainsi l'écart entre les émissions opérationnelles et la séquestration et le stockage du carbone.

Il est important de noter que ce projet n'est pas conçu pour mettre en avant la séquestration du carbone sur les parcours de golf afin de donner aux clubs et aux parcours de golf une "licence" pour maintenir une empreinte carbone opérationnelle élevée. L'objectif ultime est de réduire les émissions nettes, ce qui est essentiel pour lutter contre le changement climatique.

Le nom du projet, Carbon Par, reflète cette ambition : atteindre la neutralité carbone, zéro émission nette, sans payer pour des compensations à un tiers. Cela fait écho aux aspirations des golfeurs qui s'efforcent d'atteindre le par ou mieux. Que ce soit en allant au-delà de la neutralité carbone ou en jouant sous le par, les deux sont des nombres négatifs. Les émissions négatives et un score de golf en dessous du par indiquent un résultat positif. L'idée est que les parcours de golf deviennent des "joueurs à zéro" ou mieux, à cet égard.

Le projet, avec toutes ses applications pratiques, visait à peindre ce tableau et à inspirer les décideurs dans le domaine du golf. Ainsi, ce serait un moyen pour les agences de réglementation, dans et au-delà du golf en France, d'exercer un leadership de pensée inspirant.

Creuser plus profond pour trouver les traces de séquestration

L'étude met un accent particulier sur l'analyse du COS **au-delà** des 15 cm de profondeur, une limite souvent adoptée dans les recherches précédentes sur le COS des parcours de golf. Ce carbone en profondeur peut s'accumuler par divers mécanismes, tels que les exsudats racinaires profonds, le lessivage des formes solubles de carbone et la gravité.

Ce projet vise à ouvrir de nouvelles voies pour améliorer notre compréhension de la dynamique du carbone organique des sols des parcours de golf, augmenter la couverture géographique des données accessibles sur le carbone organique des sols des parcours de golf, et aider à développer une méthode d'inventaire du carbone de base, à la fois rentable et robuste, pour les parcours de golf.

Sélection des sites

Les sites de l'étude sur les parcours de golf suivants ont été sélectionnés : Mérignies Golf et Country Club, au Nord, près de Lille et de la frontière belge ; Golf Bluegreen Bordeaux-Lac, au Sud ; et Golf National, dans la région Sud-Ouest de Paris.

Mérignies est une entreprise familiale, un établissement de golf moderne qui a montré un leadership inspirant en quantifiant les émissions de gaz à effet de serre résultant de ses opérations.

Bordeaux-Lac est géré par UGOLF, la plus grande entreprise de gestion de parcours de golf tiers en France, et c'est le seul site d'étude des trois qui est le plus directement menacé par les conséquences du changement climatique, en raison de sa faible altitude par rapport au niveau de la mer.

Le Golf National, géré par la Fédération Française de Golf, a accueilli la Ryder Cup en 2018 et la compétition de golf des Jeux Olympiques de 2024. Anciennement intégré au domaine de chasse du Grand Parc de Versailles de Louis XIV, ce site est particulièrement bien choisi pour incarner le rôle pionnier de ce projet en matière d'action climatique, non seulement pour le golf mais aussi pour d’autres initiatives environnementales.

Méthodes et chronologie

Pour concevoir des plans d'échantillonnage du sol pour les trois sites d'étude, une analyse de bureau a été effectuée pour déterminer le type de sol et l'historique d'utilisation des terres, principalement à travers des cartes en ligne publiques et des photographies aériennes. Des entretiens ont été menés avec le personnel clé des parcours de golf, lors de réunions en ligne et par e-mails.

Des visites de site ont été réalisées en mars 2023 pour vérifier les résultats de cette première analyse et des échanges complémentaires. De plus, la visite a été utilisée pour des réunions au sein de l'équipe de projet et avec le MNHN, afin de confirmer la méthodologie du projet.

Des cartes détaillées ont été produites pour tous les sites en avril 2023 et une analyse spatiale a été réalisée, révélant les superficies totales pour chaque zone unique de sol, d'historique d'utilisation des terres, d'approche de gestion, *etc*.

Ces ressources ont ensuite permis de concevoir des plans d'échantillonnage du sol. En utilisant des images satellites, des cartes historiques, des photographies aériennes et des cartes pédologiques, des zones ont été définies en fonction de combinaisons uniques de l'historique d'utilisation des terres (âge), des types de sols et des pratiques de gestion. L'accent a été mis sur les fairways, les zones de rough entretenues et d'autres végétations telles que les prairies préexistantes et aménagées. Chaque combinaison unique de ces caractéristiques est appelée *stratum* (au singulier) et *strata* (au pluriel). Les greens, approches, départs, bunkers de sable, plans d'eau et surfaces dures ont été exclus de l'échantillonnage.

Les plans d'échantillonnage du sol incluaient au minimum un échantillon par *stratum*, avec 3 à 5 réplicats pour chaque *stratum*. Les points d'échantillonnage ont été déterminés à l'aide d'un algorithme de randomisation conditionnée visant un degré de couverture optimal du site pour les besoins d'inventaire. Cette approche respecte autant que possible les méthodologies de certification des crédits carbone, tout en prenant en compte les contraintes budgétaires.

Les plans d'échantillonnage du sol ont été mis à jour et l'échantillonnage du sol a été effectué fin juin et début juillet 2023. Des échantillons ont été collectés jusqu'à une profondeur maximale de 100 cm.

Les échantillons ont été analysés pour %C (ISO 10694:1995), %N (ISO 13878:1998) et la densité apparente (ISO 11272:2017) à trois intervalles de profondeur : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-100 cm. L'analyse en laboratoire a été achevée en août 2023.

Une analyse et une discussion préliminaires des données ont eu lieu en septembre-octobre 2024. L'objectif était d'identifier et de rapporter les tendances émergentes en fonction du temps, des caractéristiques du sol et des pratiques de gestion.

Des méthodes d'estimation de la biomasse aérienne ont été testées durant l'hiver 2023-2024, puis mises en œuvre en avril 2024. L'objectif était d'estimer le carbone stocké dans la biomasse des plantes ligneuses, en identifiant les espèces à l'aide de données satellites et LiDAR.

Le reporting a été effectué en parallèle, avec l'objectif de discuter de la qualité des données, d'identifier des domaines pour de futures recherches et de produire des directives de pratiques de gestion et scientifiquement étayées pour les gestionnaires de parcours de golf. Cela a été conclu en mai 2024.

Mérignies Golf & Country Club

Historique d'utilisation des terres

Le Mérignies Golf & Country Club est une entreprise familiale établie peu après le tournant de ce siècle, dans une transition depuis l'agriculture dont les archives des propriétaires indiquent qu'elle a commencé dès le XVIe siècle.

Cette agriculture était typique de la France, incluant le labour et la fertilisation. Les cultures comprenaient du blé, de l'orge, des betteraves à sucre, des haricots, des petits pois, des citrons, des pommes de terre et de la luzerne. Celles-ci sont plantées et récoltées en cycles d'un an, à l'exception de la luzerne, qui est souvent cultivé pendant trois années consécutives.

Une enquête archéologique, réalisée dans le cadre de demandes de permis de planification et de construction, a révélé des vestiges romains (près du trou 8 sur La Valutte), datant du Ier siècle après J.-C. Il s'agissait d'un puits, construit avec des tuiles en terre cuite. Les vestiges ont été recouverts de plastique et leur emplacement a été enregistré.

Développement du golf

Le complexe de golf dispose de trois boucles de neuf trous, toutes commençant et se terminant près du clubhouse. Les premiers neuf trous, Val de Marque, ont ouvert en 2008, suivis par La Valutte en 2010 et Rupilly en 2014. La construction de chaque parcours, ou boucle, a pris deux ans, à l'exception de Rupilly, qui a duré trois ans. La propriété peut donc être divisée en trois catégories d'âge.

Certaines zones de gestion minimale existent, par exemple la zone par laquelle les joueurs passent entre le clubhouse et le parcours de Rupilly. Cette zone n'a pas été modifiée lors de la construction, à l'exception du semis de ray-grass. Cette zone est tondue une fois par an et l'herbe est enlevée.

Depuis le début du projet de golf, environ 70 000 arbres ont été plantés. En 2018, une étude a été réalisée avec la Fédération Française de Golf et le Muséum National d'Histoire Naturelle, dans laquelle un inventaire de la biodiversité a été produit, avec une étude de suivi prévue.

Mérignies a joué un rôle de leader dans l'action climatique dans le golf français, en menant une étude approfondie de ses émissions de gaz à effet de serre, conformément aux directives de l'ADEME.

Sol

Le sol est généralement riche en argile. Les variations incluent les trous 8-9 sur Val de Marque et les trous 4-7 sur Val de Marque, qui ont une teneur en sable plus élevée. Environ 1,5 million de m^3 de sol ont été importés. Avant cela, les 30 cm supérieurs de terre arable ont été conservés et ensuite réépandus à une épaisseur uniforme d'environ 20 cm. Cela a été fait sur l'ensemble de la zone du parcours de Rupilly.

Les fairways de Val de Marque et de La Valutte conservent leur sol d'origine, car aucune terre importée n'a été ajoutée. Toutefois, lors de la construction du parcours, une partie du sol a été légèrement déplacée afin de créer des variations de relief et d'ajouter de l'intérêt au parcours, tout en maintenant la terre arable sur ces zones.

Sur Val de Marque et La Valutte, un sol limoneux a été ajouté à une profondeur uniforme d'environ 40 cm, sur les zones externes, avant que les 20 cm de terre arable ne soient réépandus en tant que couche supérieure du nouveau profil de sol.

26/05/1957 (Page 46)

Une revue approfondie des cartes historiques et des photographies aériennes a été effectuée pour étudier l'histoire de l'utilisation des terres des sites et valider les témoignages verbaux. Cette photographie aérienne verticale est la plus ancienne image publique disponible du site actuel du Mérignies Golf et Country Club. La carte des installations de golf de Carbon Par a été superposée sur cette photographie pour offrir une perspective supplémentaire et illustrer l'évolution du site.

29/07/2004 (Page 48)

Les photographies aériennes les plus récentes avant le début du développement du golf. Elles ont été modifiées pour augmenter la luminosité, et la carte actuelle du parcours a été superposée.

19/08/2009 (Page 50)

Deux photographies aériennes du 19.08.2009 assemblées. Ce sont les premières photographies disponibles au public par l'IGN après le début de la construction du golf.

De plus, la base de données de l'IGN suggère qu'il existe des images disponibles depuis 2012, mais leur importation a échoué en raison d'un problème technique inconnu.

Répartition des surfaces du Mérignies Golf & Country Club :

(Page 58) Surfaces exprimées en m^2.

Classe de caractéristiques	Val de Marque	La Valutte	Rupilly	Putting / Jeu court	Zone	Clubhouse	Total
Fairways	49,574	27,166	42,171	4,436	18,603	2,057	144,005
Première coupe de rough	242,796	125,272	208,362	15,186	19,661	44,865	656,141
Deuxième coupe de rough	0	0	0	0	0	0	0
Chemins en herbe	0	0	0	0	0	0	0
Herbe haute	62,166	23,830	13,023	3,121	0	0	102,140
Arbres / Forêt	32,963	6,594	7,882	789	1,823	0	50,051
Greens	4,981	2,342	3,926	563	183	1,519	13,515
Approches	3,170	2,230	2,874	203	0	703	9,180
Départs	3,426	2,683	3,327	186	1,785	0	11,407
Bunkers de sable	4,346	1,765	2,326	260	0	0	8,697
Caractéristiques aquatiques	32,391	3,454	7,131	0	0	0	42,976
Chemins	11,696	3,022	4,983	844	526	3,110	24,181
Routes	402	533	0	0	0	1,733	2,668
Ponts	24	0	24	0	0	0	49
Aménagements en dur	0	313	0	184	53	6,672	7,222
Bâtiments	42	452	0	0	0	911	1,406
Jardins ornementaux	0	3	0	0	0	792	795
Pelouses	98	710	0	0	0	3,605	4,413
Total	55,595	15,166	20,665	1,677	2,363	17,527	112,993

Golf Bluegreen Bordeaux Lac

Contexte

En raison de sa faible altitude par rapport au niveau de la mer, le Golf Bluegreen Bordeaux-Lac est le site d'étude des trois qui est le plus directement menacé par les conséquences du changement climatique. Le site comprend trois parcours : La Jalle, ouvert en 1978 ; Etangs, de 1989 ; et un parcours de par-3, qui a été reconstruit en 2012. Aujourd'hui, l'établissement est géré par UGOLF, la plus grande société de gestion de parcours de golf tierce en France.

La Jalle de Blanquefort, une rivière affluente de la Garonne toute proche, traverse la propriété d'Ouest en Est le long de sa limite Nord. L'altitude varie de 3 à 4 mètres au-dessus du niveau de la mer, et le sol est principalement argileux avec une nappe phréatique salée permanente.

Les parcours de golf sont situés sur l'ancien lit de la Garonne, caractérisé par un sol argileux. Avant leur aménagement, la terre était utilisée principalement pour l'élevage et la culture de céréales, ce qui suggère une activité de pâturage sur le site. Si cette utilisation était continue, sans interruption par le labour, cela pourrait être un facteur important à considérer lors de l'interprétation des résultats. Le parcours plus ancien, La Jalle, a été construit en 1977, et ses fairways ont été aménagés sur le sol d'origine, composé d'argile et de limon. En revanche, pour le parcours plus récent, Etangs (construit en 1988), des travaux de terrassement ont été réalisés, et des excavations de lac ont été utilisées pour surélever les zones de jeu, sans conserver le sol supérieur existant.

Sol

Classe de sol 14 : Marais de l'estuaire de la Gironde

Numéro de l'unité cartographique de sol (UCS) 14. Il s'agit d'une combinaison de deux unités typologiques de sol (UTS), numérotées 30 et 31, représentant respectivement 55 % et 45 %. Cette classification des sols est rapportée pour couvrir environ 22 000 hectares dans les Landes et la Gironde.

Le sol de type 30 est argileux, gris, profond, avec un gley sodique et une nappe phréatique salée permanente. Il présente également des paléosols organiques enfouis et est classé comme un réductisol typique, sodique, avec un matériau parental alluvial.

Le type de sol 31 est classé de manière similaire à l'UTS 30 mais avec des caractéristiques de calcaire, c'est-à-dire un horizon gypsique profond. Le matériau parental est une alluvion calcaire.

Les sols argileux sont connus pour leur capacité à stabiliser le carbone organique. Les fines particules d'argile forment des agrégats avec la matière organique, ce qui peut protéger le carbone organique du sol (COS) d'une décomposition rapide.

29/09/1934 (Page 68)

Toutes les photographies aériennes disponibles de l'IGN, entre 1934 et 2012, ont été étudiées. Il s'agit de la plus ancienne photographie aérienne analogique verticale publique disponible en ligne de la zone maintenant occupée par le Golf Bluegreen Bordeaux-Lac. Une photo datant du 17 mai 1947, fournie dans les annexes, montre également une certaine activité dans le coin Sud-Est, qui pourrait correspondre à une eau stagnante avant l'installation des fossés de drainage.

29/09/1934 (Page 71)

La même image que celle présentée sur la page précédente, avec le parcours de golf actuel superposé.

1974 Infrarouge (Page 72)
La photographie aérienne la plus récente et publiquement disponible avant le début des travaux de construction du golf a été identifiée dans la collection.

Juin 1976 (Page 74)

Plus ancienne photographie aérienne montrant l'activité de construction du golf

17/04/1978 (Page 76)

La plus ancienne photographie aérienne montrant le golf de La Jalle, tel qu'il était établi à l'époque, avant son aménagement actuel.

1988 (Page 78)

Construction du parcours des Etangs.

Images satellites 1985-2014 (page 80)

Une comparaison des images satellites de 2011 et 2013 indique une rénovation du parcours de par-3 au cours de cette période.

Bermuda Grass (Page 86)

Lors d'une visite sur site le 22 mars 2023, Benoit Falgayrac a démontré comment le bermuda (*Cynodon dactylon*) prend progressivement racine à Bordeaux Lac

Analyse spatiale (Page 88)

Tableau 4. Surface en m^2

Caractéristiques	Etangs	La Jalle	Par 3	Terrain	Clubhouse	Total
Fairways	102,564	90,232	5,217	0	104	198,116
Première coupe de rough	184,203	182,682	13,572	5,541	516	386,514
Deuxième coupe de rough	0	0	0	0	0	0
Chemins en herbe	463	3,052	0	0	0	3,514
Fétuque profonde	22,518	19,805	154	0	0	42,477
Arbres / Forêt	30,877	118,733	5,841	2,112	912	158,476
Caractéristiques d'eau	34,142	6,754	2,497	20,322	0	63,715
Greens	7,043	6,399	2,115	0	368	15,925
Approches	0	0	0	0	751	751
Départs	6,136	5,180	217	0	0	11,533
Bunkers de sable	3,791	4,944	382	0	0	9,117
Bâtiments	0	1,441	0	0	1,675	3,116
Pont	162	0	0	24	0	187
Aménagement urbain	50	2,625	0	0	4,710	7,385
Chemins de chariot	4,458	6,797	235	393	2,058	13,941
Routes	0	0	0	0	0	0
Jardin esthétique	0	986	0	0	0	986
Pelouse	0	2,072	0	0	164	2,236
Total	**14,598**	**20,987**	**834**	**417**	**9,194**	**46,029**

Le Golf National

Contexte

Le Golf National appartient à la Fédération Française de Golf et est le principal site pour les tournois de golf et l'entraînement d'élite en France. Il dispose de deux parcours de golf de 18 trous, Albatros et l'Aigle, d'un parcours plus court de 7 trous, l'Oiselet, et d'une vaste zone d'entraînement ou de performance sur environ 145 hectares au Sud-Ouest de Paris.

La construction du golf a principalement été réalisée de 1987 à 1991 (Hubert Chesneau, site web de Le Golf National, 2023). Depuis lors, le parcours Albatros a accueilli de nombreux tournois de golf nationaux et internationaux d'élite, notamment la Ryder Cup en 2018 et la compétition de golf des Jeux Olympiques de 2024.

Sol

Il est rapporté que les sols pré-construction comprennent principalement des luvisols typiques selon la classe de sol 29, c'est-à-dire dont le nom UCS est Sommet du plateau céréalier du Hurepoix, constitué d'un épais limon sur argile avec des meules de Montmorency.

Dans une moindre mesure, le site est également signalé comme ayant des planosols sédimorphes, selon la classe de sol 31, qui appartiennent aux bordures des plateaux boisés des Alluets, de Trappes et de Saint Arnould, caractérisés par un limon plus ou moins sablonneux sur des sables de Lozère et de l'argile de meule.

Histoire de l'utilisation des terres

Le Golf National est situé dans l'ancienne zone des grandes chasses de Louis XIV, qui ordonna la protection de cette région par un mur comportant 24 portes, dont la Porte de Mérantais, visible aujourd'hui près de la zone de performance de jeu court, à la limite Sud du site. Cette porte figure sur la liste des bâtiments protégés, comme l'a enregistré le ministère de la Culture, art. R. 621-80 du Code du patrimoine.

Carte de Cassini

L'histoire de Guyancourt indique que Louis XIV a acheté le terrain au Vicomte Pierre de Bérulle, le dernier seigneur de Guyancourt, en 1693 (site officiel de Guyancourt).

L'emplacement approximatif du Golf National actuel est superposé sur une carte de Cassini, provenant de la soi-disant copie de Marie-Antoinette du XVIIIe siècle, gravée et aquarellée, avec la carte de Golf National de Carbon Par visuellement ajustée et superposée.

Carte des staff 1818-1824

L'une des prétendues cartes officielles françaises, produites de 1818 à 1824, représentant les environs de Paris, comprend une référence à l'Orme d'Enfer et montre quelques petits étangs à l'emplacement actuel du parcours Albatros. Cela suggère que le site avait de l'eau stagnante. Ci-dessous se trouvent les traductions en anglais des références faites sur la carte. La page suivante présente les traductions des noms de la structure actuelle du golf et des repères superposés sur cette carte, afin de faciliter une comparaison visuelle par le biais de la feuille de page :

- L'Orme d'Enfer = Elm from Hell
- Barrière verte de Mérantais = Merantais green barrier
- Porte de Mérantais = The gate of Merantais
- Les Marnières = The Marnieres
- Le Mare des Champs = The Sea of Fields
- Remise du Pont des Boulangers = The Bakers' Storage and Bridge
- Le Quatre Chemins = The Four Paths
- La Marne bouton = The Marne button
- Mairie = City Hall

Golf National superposé sur la carte de 1818-1824 (Page 102)

Carte du site du Golf National de Carbon Par, avec les traductions des noms de lieux en anglais superposées sur la carte du personnel français.

1820-1866 (Page 104)

D'autres cartes du 19ème siècle fournissent moins de détails que les cartes du personnel.

1933 (Page 108)

La plus ancienne photographie aérienne disponible en ligne.
Remarques :
Arbres individuels dispersés, en particulier le long des bordures des champs dans la partie sud du site, sur et autour du 14e trou.
Bois près de la Porte de Mérantais. Cela semble avoir fait partie d'un plus grand bloc de forêt, dont la majeure partie se trouve maintenant au-delà ou plus au Sud.

21 juillet 1985 (Page 110)

La photographie aérienne en ligne la plus récente disponible avant la construction.

Septembre 1986 (Page 112)
Photographie au niveau du sol, provenant du site officiel du Golf National, prise depuis l'intérieur du site du Golf National, en direction de Villaroy, montrant certains des peupliers qui sont maintenant devenus plus denses.

11/07/1987 (Page 114)
La photographie aérienne indique le début des constructions en 1987. La première photographie aérienne montrant une telle activité date du 11 juillet 1987. Celle-ci montre des tas de terre importée le long du bord occidental du 17e trou actuel. Cela est cohérent avec le récit historique fourni par Hubert Chesneau sur le site de Le Golf National. Il écrit : « À partir de juillet 1987, le site a reçu environ 400/450 camions par jour, déchargeant leurs chargements. »
Superposition du golf sur l'image historique 1987-07-11

« À partir de juillet 1987, le site a reçu environ 400 à 450 camions par jour. »

- Hubert Chesneau, architecte.

Début de la construction
La construction a commencé à l'hiver 1986-87, avec l'importation de terre excédentaire provenant de divers projets de construction dans la région parisienne. Photo provenant du site officiel du Golf National.

Septembre 1987
Les sites de greens proposés à l'époque pour les trous 1, 2 et 3 sont ici indiqués sur une photographie aérienne oblique de septembre 1987.
La construction a été répartie en différentes zones ou phases. Une description verbale de cela par l'architecte de golf Hubert Chesneau a été utilisée pour informer le plan d'échantillonnage des sols. Photo provenant du site officiel du Golf National.

Juin 1988 (Page 120)
Une occasion rare de voir la surface du sol de près.

Septembre 1988 (Page 122)
Photographie aérienne oblique orientée au Sud-Est, avec la porte de Mérantais en haut à droite. Ici, diverses caractéristiques du golf commencent à prendre forme. Photo provenant du site officiel du Golf National.

03/11/1988 (Page 124)
Il a été rapporté que la construction du golf a inclus l'importation d'environ 1,6 million de mètres cubes de terre provenant de travaux de terrassement à Paris et dans ses environs. Cela a été principalement utilisé pour surélever le terrain autour des trous de golf et des allées, afin d'ajouter de l'intérêt et d'améliorer la visibilité pour les spectateurs (Hubert Chesneau, site de Golf National).
Avant que cette terre importée ne soit étalée, une partie du sol original du site a été prélevée dans des fosses profondes de 3 m et stockée jusqu'à ce qu'une nouvelle topographie ait été créée avec la terre importée (Arthur Lecomte, récit oral 2023). Ensuite, le sol original a été réétalé à une épaisseur estimée de 30 cm (Hubert Chesneau, récit oral 2023).

En dessous de 30 cm, une grande variabilité du sol.

30/05/1989 (Page 126)

Dans une photographie aérienne du 30 mai 1989, la partie ouest du parcours de l'Albatros prend forme, avec des travaux de terrassement en cours sur une grande partie de la partie est. La terre importée semble être étalée sur des parties du parcours de l'Aigle.

26/07/1990 (Page 128)

Une photographie aérienne du 26 juillet 1990 montre que le parcours de l'Aigle et la zone de performance semblent encore en construction, tandis que les semences de gazon ont déjà germé sur le parcours de l'Albatros.

18/05/1992 (Page 130)

Cette photographie aérienne du 18 mai 1992 montre le plan d'utilisation des terres initial du golf pleinement mis en œuvre.

Images satellites 1985-2006 (Page 132)

La recherche a inclus des images satellites de Landsat, Copernicus, Sentinel 2, Maxar Technologies, Google Earth et Microsoft Bing.

Images satellites 2007-2015 (Page 134)

Parmi les dix-huit images présentées ici, la plupart couvrent la période de 2002 à 2020, avec des écarts de trois ans de chaque côté d'une image de 2011.

Images satellites 2016-2020 (Page 136)

Les images de 2018 et des années précédentes montrent les infrastructures temporaires pour la Ryder Cup, à différents stades d'achèvement.

Analyse spatiale = Tableau 5 (Page 138). Surface en m^2

**Classe de caractéristiques	Parcours Albatros	Parcours Aigle	Parcours Oiselet	Champ 1	Champ 2	Zone de performance	Clubhouse	Total
Greens	11,056	7,023	2,057	0	0	2,341	4,883	16,305
Départs	5,683	3,445	872	1,558	2,454	383	443	9,154
Fairways	75,091	75,644	10,942	35,148	13,087	4,047	2,415	141,283
Chemins en gazon	171	0	0	0	0	0	0	0
Pelouse	0	0	1,275	0	0	0	11,065	12,340
Jardin esthétique	0	0	342	0	14	0	1,362	1,718
Première coupe de rough	153,975	246,751	1,336	0	14,812	7,539	18,141	288,579
Deuxième coupe de rough	116,805	529	16,431	10,735	4,142	3,084	5,837	40,758
Fétuque à herbe profonde	205,374	7,320	47,173	1,162	921	16,328	15,398	88,302
Arbres et forêts	19,588	74,002	19,231	3,988	0	6,851	13,894	117,966
Bunkers de sable	4,384	1,375	189	0	0	271	496	2,331
Caractéristiques aquatiques	42,447	456	1,106	0	0	2,804	0	4,366
Pont	19	0	0	0	0	0	0	0
Chemins de voiturettes	27,697	3,548	4,256	392	883	692	15,255	25,026
Routes	0	0	184	0	0	0	0	184
Infrastructure en dur	75	0	0	0	0	346	25,774	26,121
Bâtiments	0	0	328	68	0	56	9,395	9,847
Total	**570,288**	**333,981**	**90,249**	**16,277**	**20,772**	**37,569**	**70,382**	**569,230***

Échantillonnage des sols

Le plan de conception de l'échantillonnage des sols a deux objectifs principaux : établir un inventaire du carbone organique du sol, qui sera revisité ultérieurement, et faciliter des hypothèses logiques sur les changements de COS (Carbone Organique du Sol) en incluant, d'une part, des échantillons de chaque zone représentant une combinaison unique de sol, d'historique d'utilisation des terres et de gestion, et d'autre part, des zones qui représentent le mieux une comparaison appropriée, c'est-à-dire des échantillons de contrôle.

L'accent est mis sur les zones où les déchets de tonte sont laissés sur place, une pratique principalement propre aux parcours de golf. D'autres échantillons sont collectés pour l'inventaire et pour des recherches plus générales sur les stocks de carbone organique du sol dans les parcours de golf, ainsi que pour mettre en lumière le leadership inspirant exercé par le Fonds de dotation FFGreen à travers cette initiative. De plus, cet effort peut servir de référence et marquer une étape significative dans le parcours vers des opérations à faible émission de carbone, en permettant des mesures répétées plusieurs années plus tard, afin de détecter l'évolution réelle du COS au fil du temps.

Rough tondu

Les images satellites montrent que les limites internes entre les différentes coupes de rough ont changé au fil des ans. Par conséquent, elles sont jugées inadaptées à l'échantillonnage des sols si l'objectif est d'étudier la hauteur de coupe et la fréquence comme variable. Le rough situé à côté des allées est donc une source de données peu fiable en raison de la largeur variable de chaque hauteur de coupe au fil du temps. Cela est particulièrement vrai dans le cas du Golf National.

À l'inverse, la zone de rough tondu entre le départ et l'allée est ici considérée comme une source plus fiable. La zone immédiatement devant les départs les plus avancés revêt un intérêt particulier, car elle est moins susceptible d'avoir été soumise à l'intense circulation piétonnière et aux passages fréquents des voiturettes, caractéristiques des corridors de jeu. Par conséquent, elle est plus à même de refléter de manière plus précise des zones gérées de la même manière dans le reste de la zone de jeu.

« Le plan d'échantillonnage des sols a deux objectifs principaux : établir l'inventaire du COS (Carbone Organique du Sol), qui sera revisité ultérieurement, et observer les tendances entre les zones échantillonnées avec une combinaison unique d' historique d'utilisation des terres, sol, gestion, âge, *etc*. »

Emplacement des points d'échantillonnage

Les points d'échantillonnage ont été définis grâce à une approche combinée. Les limites de chaque zone présentant une combinaison unique de types de sol, d'historique d'utilisation des terres, de méthodes de gestion et d'âge ont été cartographiées à l'aide d'un logiciel SIG. Pour atténuer l'impact des variations fréquentes et mineures des contours de tonte, un tampon intérieur de 8 mètres a été appliqué sur ces limites.

Dans chaque zone ainsi délimitée, des points d'échantillonnage ont été initialement sélectionnés à l'aide d'un algorithme de randomisation conditionnelle. Ces emplacements ont ensuite été ajustés manuellement, en tenant compte de divers critères, notamment :
a. une distribution globale uniforme sur le site.
b. la proximité des chemins ou des routes de service.
c. les tuyaux et fils souterrains estimés.
d. le parcours de l'équipement d'échantillonnage, pour minimiser le déplacement sur le gazon.
e. la pente.

L'échantillonnage des sols a été réalisé par Agricarbon, partenaires de Carbon Par, au Golf National le 27 juin 2023, à Mérignies le 29 juin et à Bordeaux-Lac le 3 juillet.

Mérignies Golf & Country Club

Échantillons de test
Mérignies a jusqu'à présent été développé en trois étapes principales, avec des boucles de neuf trous ouvertes en 2008, 2010 et 2014, générant trois catégories d'âge de gazon. Comme au Golf National, la plupart des trous de golf ont été développés avec de la terre importée et une conservation du sol de surface.

Des échantillons ont été prélevés sur les allées, le rough entretenu et d'autres types de végétation, avec cinq réplicas pour chaque phase de développement ou boucle de neuf trous. En complément, trois carottes ont également été prélevées à l'extrémité du champ d'exercice du jeu.

Échantillons de contrôle
Douze échantillons de comparaison ont été inclus, soit trois pour chaque scénario ou zone. Deux d'entre eux ont été définis à la suite de la première discussion en ligne avec Béatrice Gaulier et Philippe Vanbremeersch (points 16, 20-21 sur Val de Marque et 39-41 sur Rupilly), et deux autres ont été déterminés après une visite sur site (points 29, 31-32 sur Rupilly et 63-65, plus centralement, sur ou près du site proposé pour l'hôtel).

Nombre total de carottes à Mérignies : 65.

Golf Bluegreen Bordeaux-Lac

Échantillons de test
Le vieux parcours de La Jalle au Bordeaux Lac a été construit à la fin des années 1970, avec un minimum de terrassement. Le parcours plus récent des Étangs a été façonné dix ans plus tard avec de la terre excavée pour former ses étangs. Les discussions avec les représentants du parcours indiquent que la terre de surface d'origine n'a pas été conservée avant ce terrassement, et que la couche supérieure actuelle de sol peut donc provenir de différentes profondeurs. Les hypothèses logiques sont donc difficiles dans le cas des Étangs, tandis que La Jalle présente une situation beaucoup plus claire.

Le plan d'échantillonnage des sols comprenait cinq réplicas d'échantillons pour chacune des deux moitiés Est et Ouest de La Jalle, situées de part et d'autre du clubhouse, en tenant compte du mélange actuel des deux parcours. Afin d'examiner l'origine supposément chaotique des sols dans la zone des Étangs, le plan a inclus le maximum d'échantillons possible dans cette région, tout en respectant les contraintes de budget et la capacité quotidienne prévue de l'équipement et de l'équipe d'échantillonnage.

Trois réplicas d'échantillons ont également été prélevés sur les allées et le rough entretenu du parcours à l'Ouest de l'entrée du site, considérés comme représentatifs d'une troisième catégorie d'âge. En raison de la conception compacte du site, qui offre un nombre élevé de trous sur une superficie relativement réduite, peu de zones de végétation non gérées sont présentes sur la propriété. Par conséquent, seules deux séries d'échantillons, composées de deux carottes chacune, ont été collectées pour représenter d'autres types de végétation.

Échantillons de contrôle
La plupart des emplacements d'échantillons sélectionnés pour représenter d'autres types de végétation ont été utilisés comme échantillons de contrôle, soit un total de neuf échantillons répartis sur quatre zones distinctes. Parmi ces zones, deux ont été jugées plus pertinentes et significatives que les autres et ont donc bénéficié de trois réplicas chacune, tandis que les deux autres n'en comptaient qu'un seul.

Nombre total de carottes à Bordeaux Lac : 65.

Le Golf National

Le Golf National a été construit avec de la terre importée, à l'exception de l'extrémité Nord-Est du parcours Aigle. Le sol de surface d'origine a été conservé et reprofilé après le nivellement. En considérant les informations verbales sur les sources de sol de surface fournies par l'architecte Hubert Chesneau, nous avons divisé le site en dix zones, où :

- Chacune des zones 1 à 5 a probablement la même source de sol de surface selon HC. La zone 5 comprend les premier et dernier trous du parcours Aigle, qui ont été conçus pour s'harmoniser avec le paysage manufacturé de l'Albatros, selon Chesneau.
- La zone 6 est établie comme une zone de transition, où l'utilisation de terre importée a été progressivement réduite d'Ouest en Est.
- La zone 7 est établie comme la partie du parcours Aigle qui a été développée avec un minimum de terrassement. Cela est identifié comme une zone particulièrement importante pour la recherche sur le carbone du sol des gazons.
- La zone 8 est l'Oiselet.
- Les zones 9 et 10 représentent les deux zones d'entraînement. À partir de celles-ci, les carottes ne sont prélevées que dans la zone de réception principale des balles, comme indiqué par un contour de tonte cohérent à travers toutes les images satellites mentionnées précédemment.

Échantillons de test
Dans chacune des huit premières zones, nous incluons 3 échantillons des allées (hauteur de tonte la plus basse sur les zones d'entraînement) et du rough entretenu (1ère coupe), ainsi qu'un échantillon d'autres végétations. Cela produit 7 carottes pour chaque zone 1-8, pour un total de 56.

Trois carottes sont prélevées dans chacune des deux zones d'entraînement, pour un total de six carottes.

Échantillons de contrôle
Les photographies aériennes historiques et les images satellites indiquent que l'ensemble du site a été perturbé pendant la construction. Par conséquent, il est suggéré que des échantillons de comparaison soient prélevés sur d'autres propriétés environnantes. Celles-ci sont divisées en huit zones, une pour chaque type de culture identifié par une inspection visuelle des images satellites. Une carotte est spécifiée par zone, pour un total de huit carottes.

Nombre total de carottes au Golf National : 70.

Analyse en laboratoire, résultats et autres données

946 Échantillons de sol analysés

Agricarbon a effectué une analyse élémentaire (Dumas) pour évaluer la concentration de carbone organique dans le sol (SOC%) et la densité apparente (BD) pour chaque carotte de sol collectée, selon trois couches de profondeur prédéfinies : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-100 cm. La méthode est conforme à la norme ISO 10694:1995 pour le SOC% et ISO 11272:2017 pour la BD.

Une analyse d'un échantillon de BD révèle la masse de sol dans un volume particulier, notée en grammes de sol dans un volume d'un centimètre cube (g/m^3). Cela est nécessaire pour calculer le stock de SOC par unité de surface, à partir de la concentration de SOC (SOC%).

Un échantillon est défini comme une couche de profondeur dans une carotte. Par cette définition, un total de 473 échantillons ont été analysés pour le SOC%. Un échantillon de BD a été analysé pour chacun d'eux, produisant un total de 946 échantillons.

La profondeur des carottes de sol est rapportée en mm. En général, la couche de profondeur la plus basse est partielle, en raison du fait que le carottier ne pénètre qu'une partie de la plage de profondeur considérée. Ces échantillons ont été analysés et rapportés, à condition qu'une quantité suffisante de sol ait été collectée pour l'analyse. Pour faciliter la comparaison entre les couches de profondeur, une colonne de données a été ajoutée pour rapporter le stock de SOC en t/ha par cm de profondeur.

Utilisation de la densité apparente pour calculer le stock de SOC (Page 154)

En utilisant les données de laboratoire, les étapes suivantes ont été suivies pour calculer le stock de carbone organique dans le sol (SOC) par unité de surface :

1. **Calculer le poids sec fin :**
   poids sec fin = Poids sec total − Poids grossier
2. **Calculer le volume fin :**
   Volume fin = Volume total − Volume grossier
   où le volume grossier est déterminé par :
   avec la densité grossière définie comme 2,65 g/cm^3 (selon les lignes directrices du GIEC).
3. **Calculer la densité apparente sèche fine :**
4. **Calculer le stock de carbone :**
   Stock de carbone = SOC% × Densité apparente sèche fine × Volume fin
5. **Calculer le stock de carbone par unité de surface :**
   Pour exprimer le stock de carbone par unité de surface, nous divisons le volume de l'échantillon par sa surface, ce qui nous donne la longueur de l'échantillon :
   Stock de carbone par surface = SOC% × Densité apparente sèche fine × longueur de l'échantillon

Ensemble de données
Le dossier partagé numériquement *Carbon Par FFGreen Deliverables* contient plusieurs fichiers

CSV, y compris *Carbon Par FFGreen Results*. C'est le fichier principal, qui contient 32 colonnes, avec des données collectées par Carbon Par et Agricarbon.

Titre de la colonne	**Description**	**Entré par**
Client	Le client de ce projet est FFGreen.	Carbon Par
ID client	Le code à trois lettres pour FFGreen est FFG.	Carbon Par
Nom du site	Mérignies Golf & Country Club, Golf Bluegreen Bordeaux-Lac ou Golf National.	Carbon Par
ID du site	Le code à deux lettres pour le nom du site ; ME pour Mérignies, BL pour Bordeaux Lac et GN pour le Golf National.	Carbon Par
Parcours	Chaque site possède plusieurs parcours de golf.	Carbon Par
ID du parcours	Ce code pour le nom de chaque parcours de golf au sein d'un site contient les deux premières lettres du nom s'il contient un mot. Sinon, il contient la première lettre des deux premiers mots du nom.	Carbon Par
Type de terrain	La zone de gestion ; fairway, rough entretenu, autres végétations, terrain d'entraînement, contrôle, *etc*.	Carbon Par
Niveau de perturbation de la construction	Valeurs comprises entre 1 et 5 par tableau.	Carbon Par
Topsoil conservé lors de la construction	Y pour Oui, N pour Non, selon le tableau.	Carbon Par
Année d'établissement du gazon	Cela est défini comme le moment où la couverture végétale nouvelle a atteint un niveau de maturité permettant l'ouverture du parcours ou de la zone concernée pour le jeu de golf. Également défini comme l'année de conversion des terres.	Carbon Par
Latitude Carbon Par	Coordonnées de latitude du lieu dans le système WGS84 selon le plan d'échantillonnage des sols.	Carbon Par
Longitude Carbon Par	Idem ci-dessus, pour les coordonnées de longitude.	Carbon Par
Coordonnées de localisation WGS84		

Titre de la colonne	Description	Entré par
Latitude	Coordonnées de latitude enregistrées par Agricarbon lors de l'échantillonnage.	Agricarbon
Coordonnées de localisation WGS84		
Longitude	Idem ci-dessus, pour les coordonnées de longitude.	Agricarbon
La latitude correspond-elle au sixième chiffre après la virgule ?	Vérification de l'emplacement d'échantillonnage précis selon le plan d'échantillonnage des sols. TRUE signifie que les coordonnées de latitude spécifiées et enregistrées correspondent au sixième chiffre après la virgule, et FALSE signifie qu'elles ne correspondent pas.	Carbon Par
La longitude correspond-elle au sixième chiffre après la virgule ?	Idem ci-dessus, pour les coordonnées de longitude.	Carbon Par
ID de ferme Agricarbon	ID du site d'Agricarbon. A01 pour Golf National, A02 pour Mérignies et A03 pour Bordeaux Lac.	Agricarbon
ID de champ Agricarbon	Non pertinent. Fixé à 001.0.	Agricarbon
ID de strate Agricarbon	Non pertinent. Fixé à A.	Agricarbon
ID de cœur Agricarbon	001 à 070 pour le Golf National, 001-068 pour Mérignies et 001-065 pour Bordeaux Lac.	Agricarbon
ID d'échantillon Agricarbon	Numéro de l'échantillon dans chaque cœur ; 1, 2 et 3. C'est également le numéro de la couche de profondeur.	Agricarbon
ID de la carotte	Une colonne séparée incluant uniquement le numéro du cœur, issu de la chaîne complète de l'ID de la carotte d'Agricarbon.	Carbon Par
Couche de profondeur	Une colonne séparée incluant uniquement le numéro de l'échantillon, issu de la chaîne complète de l'ID de la carotte d'Agricarbon, servant d'ID de la couche de profondeur ; 1 pour une profondeur de 0-30 cm, 2 pour 30-60 cm et 3 pour 60-100 cm.	Carbon Par
Date d'échantillonnage	Date d'extraction de la carotte de sol.	Agricarbon
Profondeur de la carotte en mm	Profondeur maximale atteinte par le dispositif de carottage en mm.	Agricarbon
Masse sèche totale (g)	Masse totale de l'échantillon après séchage en laboratoire, en grammes.	Agricarbon

Titre de la colonne	Description	Entré par
Densité sèche totale (g/cm^3)	Densité de masse sèche totale de l'échantillon, en grammes par centimètre cube.	Agricarbon
Masse de la fraction fine (g)	Poids des plus petites particules de sol, jusqu'à 2 mm de diamètre, crucial pour le stockage du carbone, en grammes.	Agricarbon
Densité sèche fine (g/cm^3)	Densité de masse sèche de l'échantillon, après retrait des particules de plus de 2 mm, exprimée en grammes par centimètre cube.	Agricarbon
SOC%	Concentration de carbone organique du sol dans l'échantillon, notée en pourcentage.	Agricarbon
SOC (t/ha)	Stock de carbone organique du sol en tonnes par hectare de surface.	Agricarbon
SOC (t/ha) par cm de profondeur	Stock de carbone organique du sol en tonnes par hectare de surface, divisé par la profondeur atteinte par le dispositif de carottage, en cm.	Carbon Par

Ensembles de données supplémentaires

Perturbation de la construction

Divers ensembles de données supplémentaires ont été produits et ajoutés aux données issues de l'analyse de laboratoire. Quatre fichiers csv ou ensembles de données supplémentaires sont inclus dans le dossier partagé numériquement nommé CSV, un sous-dossier des livrables de Carbon Par FFGreen.

Le mouvement et la perturbation du sol pendant la construction peuvent être des variables clés affectant la pertinence de l'analyse comparative. Des détails sur la construction des parcours de golf ont été collectés à partir d'une étude des images aériennes et de conversations avec des membres clés du personnel.

Chaque parcours ou zone, au sein des trois sites d'étude, a ensuite été assigné à l'un des cinq niveaux de perturbation du sol due à la construction, avec 1 étant le plus bas et 5 le plus élevé. Ces niveaux sont expliqués dans le fichier csv nommé *Carbon Par FFGreen niveaux de perturbation de la construction*.

Topsoil conservé

De manière similaire à la perturbation du sol lors de la construction, la conservation du sol supérieur existant constitue un élément clé. En l'absence de cette conservation, il est probable que la couche supérieure de sol, après construction, provienne d'une plus grande profondeur, où la valeur initiale de SOC est généralement plus faible.

Par ailleurs, le sol initialement présent en surface pourrait avoir été enfoui à une plus grande profondeur. Ces hypothèses impliquent une certaine émission de CO_2-e liée à la perturbation du sol.

Le fichier csv nommé *Carbon Par FFGreen topsoil conservé* contient des informations concernant les deux entrées dans l'ensemble de données principal, Y pour Oui et N pour Non.

Coordonnées de localisation
Les coordonnées de localisation sont exprimées en latitude et longitude selon le système WGS1984. L'ensemble de données comprend des coordonnées déterminées par Carbon Par, conformément au design d'échantillonnage du sol, et un autre ensemble de coordonnées enregistrées par Agricarbon lors de leur échantillonnage sur site.

Il existe quelques cas où les coordonnées d'Agricarbon ne correspondent pas aux emplacements de Carbon Par. Ces incohérences se produisent principalement dans les zones proches de la périphérie du site, où des échantillons de contrôle ont été collectés. L'incohérence peut être due à l'accessibilité pour le véhicule d'échantillonnage du sol.

L'année de conversion des terres est définie comme l'année où le parcours concerné a été ouvert au jeu de golf. Cela a été déterminé comme un point temporel plus fiable dans l'histoire enregistrée des sites d'étude. Cependant, l'établissement initial du gazon a pu avoir lieu 1 à 2 ans auparavant.

Confiance
Ces sources de données supplémentaires varient par leur nature, et donc par le niveau de confiance qui peut leur être accordé en tant que preuves. Un système pour évaluer ces niveaux de confiance n'a pas été conçu.

Mérignies Golf et Country Club : Matrice des résultats de carottage (Page 162)

Mérignies Golf & Country Club : Stock total de SOC et diagrammes en boîte (Page 164)

Stock de SOC

Le stock total de SOC au Golf Bluegreen Bordeaux-Lac a été estimé à 6 900 tonnes, en multipliant la moyenne du stock total de SOC de tous les carottages de sol provenant des strates concernées par la surface de ces mêmes strates.

Diagramme en boite

SOC %, Stocks de SOC en t/ha et densité volumique en g/cm^3 sur les fairways, les zones de fauchage, la végétation autre, le practice, le site de l'hôtel et les échantillons de contrôle au Mérignies Golf & Country Club.

Golf Bluegreen Bordeaux-Lac : Matrice des résultats de forage (Page 166)

Golf Bluegreen Bordeaux-Lac : Stock total de SOC et diagrammes en boîte (Page 168)

Stock total de SOC

Le stock total de SOC au Golf Bluegreen Bordeaux Lac a été estimé à 8 730 tonnes, en multipliant la moyenne du stock total de SOC de tous les échantillons de sol provenant des strates pertinentes par la surface de ces mêmes strates.

Diagramme en boite

SOC %, stocks de SOC en t/ha et densité apparente en g/cm^3 sur les fairways, les zones de rough entretenu, la végétation autre et les échantillons de contrôle au Golf Bluegreen Bordeaux-Lac.

Le Golf National : Matrice des résultats de forage (Page 170)

Le Golf National : Stock total de SOC et diagrammes en boîte (Page 172)

Le stock total de SOC au Golf National a été estimé à 7 261 tonnes, en multipliant le stock total moyen de SOC de tous les carottes de sol provenant des strates pertinentes par la superficie de ces mêmes strates.

Diagramme en boite

SOC %, stocks de SOC en t/ha et densité de bulk en g/cm^3 sur les fairways, les zones de rough entretenu, la végétation autre, la zone d'entraînement 1, la zone d'entraînement 2 et les échantillons de contrôle au Golf National.

Analyse sur les résultats du carbone organique du sol

Un total de 203 carottes a été prélevé sur les trois sites d'étude. La profondeur maximale de l'appareil de carottage monté sur ATV Wintex était de 100 cm. Peu de carottes ont atteint cette profondeur. 110 carottes ont été extraites avec suffisamment de sol pour enregistrer les trois couches de profondeur. Deux couches de profondeur ont été enregistrées pour 52 carottes, et seulement une couche dans le cas de 41 carottes. La majorité de ces carottes provenait du Golf National, tandis que la plupart des carottes à trois couches ont été prélevées à Bordeaux Lac.

De même, la profondeur moyenne de carottage était significativement plus grande à Bordeaux-Lac, avec un écart-type plus faible, qu'à Mérignies et au Golf National, où la profondeur moyenne de carottage était presque identique, 691 et 692 mm respectivement.

Distribution des profondeurs

Les trois sites d'étude ont des parcours qui ont été construits avec un degré élevé de perturbation. Il n'y a que trois parcours, ou parties de parcours, où la perturbation liée à la construction a été minimale.

Il s'agit de l'ensemble du parcours original de La Jalle à Bordeaux Lac, de la partie Est du Golf National, le parcours de l'Aigle et de la partie Est de Mérignies, La Valutte. Nous examinons cela de plus près, en comparant la distribution des profondeurs entre les zones à faible perturbation et celles à forte perturbation, *etc*.

Tableau 14 (Page 176)

Écart-type élevé et variabilité

Cela suggère que notre plan d'échantillonnage a réussi à capturer la variabilité au sein des sites de golf, ce qui contribue à déterminer l'intensité d'échantillonnage requise pour les études futures.

Densité volumique

La densité volumique est plus faible dans les échantillons de contrôle, comme prévu, en raison de la compaction résultant de la construction et de l'entretien des autres zones d'étude.

Valeur d'utilisation des terres

Pour comprendre la valeur des trois sites de golf étudiés en termes de séquestration et de stockage du carbone organique du sol (COS), leurs stocks de COS ont été comparés aux valeurs de base de terres cultivées et de prairies dans les régions concernées de France. Ces données ont été obtenues auprès de GIS Sol, un réseau de l'INRAE dont la mission est d'établir et de gérer le système d'information sur les sols français afin de répondre aux demandes des autorités publiques et de la société (site web de GIS Sol, INRAE, 2024).

Les données comprenaient des valeurs moyennes, ainsi que les 1er et 3e quartiles pour les terres cultivées, les prairies, les vignobles et les forêts par région administrative en France, avant qu'elles ne soient réorganisées en 2016. Par définition, le Mérignies Golf & Country Club se situe dans le Nord-Pas-de-Calais, le Golf National en Île-de-France et le Golf Bluegreen Bordeaux-Lac en Aquitaine.

Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Étant donné la différence marginale entre le pourcentage de COS et les stocks de carbone entre les fairways et les roughs entretenus, les échantillons de golf ont été analysés à partir d'une combinaison de ces deux zones. Ces données sont représentées dans la colonne "Test turf géré".

Les deux dernières colonnes indiquent la différence entre les valeurs des parcours de golf et les valeurs de référence de la base de données. Les valeurs positives indiquent que le stock de COS du parcours de golf est supérieur à la valeur de référence, et *vice versa*.

Les données suggèrent que les stocks de COS des parcours de golf s'améliorent par rapport aux valeurs de référence de la base de données à mesure qu'ils vieillissent.

Les valeurs de référence pour le Nord-Pas-de-Calais sont relativement élevées par rapport aux deux autres régions, surtout en ce qui concerne les prairies.

Des tourbières ou des zones humides avec un sol organique, supérieur à 12 % de COS, sont connues pour exister dans le Nord-Pas-de-Calais. Si celles-ci sont incluses dans l'ensemble de données, un effort pour les exclure pourrait être envisagé.

Carbone de la biomasse aérienne au Golf National

L'estimation de la biomasse aérienne au Golf National a impliqué deux méthodes différentes : une analyse par séries temporelles satellite de 2019 à 2023 et une approche basée sur la LiDAR utilisant des données du programme national français de LiDAR, collectées en mars-avril 2022. L'objectif principal était d'employer les données LiDAR plus précises pour calibrer et valider les estimations de biomasse dérivées des satellites.

Approche LiDAR

Le LiDAR (Light Detection and Ranging) est un pulse laser émis par un dispositif monté sur un aéronef ou un véhicule aérien sans pilote (UAV). Il mesure le temps que mettent les signaux réfléchis à revenir après avoir frappé un objet ou le sol. Cela produit une représentation 3D de la surface et de la structure de la végétation.

Approche Satellite

La méthode basée sur satellite incluait l'utilisation des ressources et ensembles de données suivants, entre autres :

- **Sentinel-1** et **Sentinel-2** sont des satellites du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne (ESA). Sentinel-1 est un radar à synthèse d'ouverture (SAR) qui fournit des images radar dans toutes les conditions météorologiques, indépendamment de la lumière du jour. Ce faisant, il capture la structure et le volume de la végétation.
- **Sentinel-2** prend des images optiques haute résolution dans plusieurs bandes spectrales (multispectrales). Celles-ci sont utiles pour analyser la santé et la densité de la végétation.

La plateforme de cloud computing Google Earth Engine (GEE) a été utilisée pour traiter les données issues des deux satellites. Les images radar de Sentinel-1 ont été utilisées pour dériver des valeurs d'écart interquartile (IQR) pour les polarités VV et VH. Les données de réflectance spectrale de Sentinel-2 ont été filtrées pour éliminer les nuages.

La mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) faisait partie du vol de la navette spatiale Endeavour en 2000. Cela a produit des données d'élévation pouvant être utilisées pour calculer la pente, ce qui est utile pour déterminer la précision d'un modèle d'estimation de biomasse.

L'ESA World Cover est une carte mondiale de l'occupation des sols développée par l'Agence spatiale européenne. Elle utilise des images satellite et des algorithmes avancés pour classer différents types de couverture terrestre, tels que les forêts, les terres agricoles et les prairies. Ces données sont intégrées pour fournir des informations détaillées sur la couverture terrestre dans la zone d'étude.

L'apprentissage automatique implique la création d'un ensemble de données d'entraînement, en utilisant des données provenant de GEDI et du classificateur Random Forest. GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) est un effort collaboratif entre la NASA et l'Université du Maryland. Il s'agit d'un pulse laser LiDAR monté sur la Station spatiale internationale.

GEDI se distingue du LiDAR conventionnel en ce sens qu'il capture l'intégralité de la forme d'onde de la lumière provenant de la canopée forestière et du sol. La plupart des dispositifs LiDAR classiques ne capturent que quelques retours discrets, tels que le premier, le dernier et

parfois quelques retours intermédiaires du signal laser. Cela fournit moins d'informations détaillées par rapport au LiDAR à forme d'onde complète, mais est généralement considéré comme plus précis car il est utilisé par des véhicules aériens sans pilote (UAV) qui volent à des altitudes beaucoup plus basses que les satellites, ce qui permet une résolution plus élevée. GEDI peut détecter la structure verticale des forêts, y compris la hauteur de la canopée, l'élévation du sol et la densité de la végétation.

Random Forest est un algorithme d'apprentissage automatique qui traite les informations dérivées des ressources, données et méthodes susmentionnées pour apprendre des motifs et des relations, afin de pouvoir prédire la biomasse. Le modèle entraîné estime la biomasse et ses prédictions sont validées en utilisant les données de GEDI.

Approche satellite

Données d'entraînement

Un ensemble de données d'entraînement a été produit avec les données GEDI et le classificateur Random Forest utilisé pour développer un modèle de régression basé sur ces données. Dans ce graphique, les valeurs observées de l'ensemble de données d'entraînement sont tracées par rapport aux valeurs prédites par le modèle lors de son entraînement.

Les valeurs observées sont les valeurs réelles mesurées dans l'ensemble de données d'entraînement. Les valeurs prédites sont générées par le modèle, basées sur les données d'entrée avec lesquelles il a été entraîné.

Le nuage de points vise à démontrer à quel point le modèle a appris à prédire la variable cible. La ligne diagonale représente l'égalité entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Un modèle parfait aurait tous les points sur cette ligne. Plus les points sont proches de la ligne, mieux le modèle a performé.

Importance des variables (Page 188)

Ce graphique à barres montre l'importance des variables provenant des différentes bandes satellite. Toutes les bandes numérotées proviennent de Sentinel-2. D'autres proviennent de Sentinel-1.

La bande 7 de Sentinel-2 est la variable la plus influente dans le processus d'estimation de la biomasse. Elle capte la lumière infrarouge proche, ce qui permet de distinguer la végétation d'autres types de couverture terrestre et d'évaluer la santé et la densité de la végétation.

La bande 2 détecte la lumière bleue visible, ce qui aide à évaluer les plans d'eau. Elle peut également détecter diverses conditions atmosphériques pouvant influencer la biomasse.

La bande 4 est utilisée pour divers indices de végétation, y compris l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), qui évalue la santé des plantes.

La bande 5 fournit des informations sur les espèces végétales et leur état de stress ou santé. La bande 6 est utilisée pour évaluer la santé de la végétation et la teneur en chlorophylle, ce qui est plus spécifique que la bande rouge de base.

La haute importance de la bande VH de Sentinel-1 indique l'importance des données radar en mode de polarisation verticale-horizontale. Cela est utile pour comprendre les propriétés structurelles et la teneur en humidité de la végétation.

La pente fait référence à l'inclinaison du terrain et est dérivée des données d'élévation. Cela peut influencer la façon dont la biomasse s'accumule et varie à travers différents terrains.

Détails méthodologiques supplémentaires (Page 190 Cartes d'estimation de la biomasse au-dessus du sol du Golf National, pour chaque année entre 2019 et 2023)

Les données GEDI utilisées étaient le produit de métriques d'élévation et de hauteur géolocalisées de niveau 2A (GEDI02_A) pour la modélisation de régression avec un

classificateur Random Forest. L'intégration des données GEDI (Dubayah et al., 2020) affine davantage les estimations de biomasse en incorporant des métriques de hauteur, cruciales pour comprendre la distribution verticale de la biomasse et la structure forestière (Adams M. et al., 2020).

D'autres algorithmes de classification supervisée, tels que le classificateur Random Forest (RF), la classification par vecteur de support (SVM) et l'arbre de régression (CART), ont été utilisés. Tous les algorithmes sont exécutés et le meilleur est choisi.

Adams a introduit une analyse de mélange spectral (SMA) utilisée dans Google Earth Engine (GEE) pour détecter les perturbations forestières causées par l'exploitation sélective ou les incendies de forêt. En procédant ainsi, les valeurs de réflectance par pixel sont décomposées en leurs différents spectres de matériaux purs constituants, ou endmembers spectraux, et en fractions correspondantes qui se corrèlent linéairement.

Sentinel-1 peut mesurer les structures verticales car c'est un radar à ouverture synthétique. La puissance de rétrodiffusion a été utilisée comme base pour l'estimation de la hauteur des forêts et l'amélioration des estimations en intégrant des données optiques. La SMA obtient des couches contenant la fraction pixel par pixel pour chaque endmember spécifié. En conséquence, le démélange des pixels qui en résulte met en évidence des détails dans les sous-pixels.

Changements de biomasse (Page 192 Quantification de la biomasse faible et élevée pour chacune des cinq années étudiées)

La série chronologique indique une augmentation de la biomasse au-dessus du sol, bien qu'avec quelques fluctuations annuelles. La faible biomasse montre une augmentation à un rythme relativement constant, comme prévu, étant donné que cette zone est gérée avec des hauteurs de tonte constantes. Entre 2019 et 2023, on rapporte une augmentation de 0,37 t/ha. L'augmentation annuelle moyenne sur cette période est de 0,0925 t C/ha, soit 92,5 kg C/ha.

Note d'entrée : Il est important de se rappeler ici de diviser l'augmentation totale par 4 et non par 5.

Dans les zones de haute biomasse, le processus d'estimation signale une baisse entre 2020 et 2021. Bien qu'il y ait eu une augmentation entre 2021 et 2022, les niveaux de cette dernière année n'avaient toujours pas atteint ceux de 2020. Ce n'est qu'en 2023 que les valeurs de haute biomasse ont dépassé celles de 2020.

Cela peut avoir des raisons environnementales et/ou techniques. Les raisons environnementales incluent le stress du végétal, par exemple dû à la sécheresse, aux maladies et/ou aux carences nutritionnelles, qui peuvent réduire la surface foliaire et la vigueur. Cela entraînerait une lecture de biomasse plus basse à partir des données satellitaires.

Les raisons techniques peuvent inclure le choix et le fonctionnement des algorithmes et des processus d'étalonnage. Des erreurs dans ceux-ci ou des changements dans les méthodes d'évaluation peuvent influencer les résultats.

Les images satellites peuvent également être affectées par les ombres des arbres, des bâtiments et d'autres structures. Les changements dans les conditions lumineuses entre les passages des satellites peuvent conduire à des interprétations erronées.

Les images satellites ont généralement une résolution de 10 à 60 m, selon les bandes. Une résolution de 10 m signifie qu'un pixel dans les données représente une surface de 10 x 10 m au sol. Cela peut ne pas être suffisant pour capturer de petites variations de biomasse, surtout dans une zone avec des changements fréquents et brusques entre des zones de gestion très spécifiques, comme un site de golf. Par conséquent, il existe des doutes quant à la pertinence de l'approche satellitaire à une si petite échelle.

Néanmoins, une comparaison en série chronologique entre la même période de l'année, sur plusieurs années, est susceptible de fournir une compréhension globale des tendances de biomasse sur le site, étant donné que les méthodes et ressources utilisées sont supposées être à peu près également précises, ou imprécises, dans le cas de chaque année.

Une estimation de biomasse basée sur des satellites en série chronologique est donc utile comme première étape dans le parcours à faible émission de carbone d'un propriétaire de parcours de golf, à condition que le processus soit clairement décrit et que les limites du projet soient bien définies.

Approche LiDAR (Page 194 Captures d'écran de deux couches du nuage de points LiDAR, végétation moyenne (gauche) et élevée (droite), telles qu'elles apparaissent dans le logiciel QGIS)

Les données pour le Golf National, provenant du programme national de LiDAR français, datent de mars-avril 2022. Par conséquent, les données satellites ont été collectées durant la même saison annuelle, chaque année.

Les données constituent un nuage de points avec différentes couches, comprenant la végétation élevée, la végétation moyenne et le sol.

Ceci a été utilisé pour produire trois modèles : un modèle d'élévation numérique (DEM), un modèle de surface numérique (DSM) et un modèle de hauteur de canopée (CHM).

Le DEM et le DSM sont directement dérivés du nuage de points. Le DEM représente les élévations du terrain, parfois appelé modèle numérique de terrain (DTM). Le DSM est le modèle de surface des points les plus élevés enregistrés, y compris les cimes des arbres et les toits.

Le modèle de hauteur de canopée est ensuite produit en soustrayant le DEM du DSM. Cela indique la hauteur et la structure des arbres et d'autres végétations.

Équations allométriques :

Pour calculer des indicateurs spécifiques à une région, des équations allométriques ont été développées et publiées pour diverses régions, espèces d'arbres et types de végétation. Beaucoup de ces équations sont conçues pour estimer la biomasse et le carbone dans les arbres à partir du diamètre à hauteur de poitrine (DBH, 130 cm au-dessus du sol). Cependant, certaines équations ont été développées pour la hauteur de la canopée ou la hauteur mesurée au sol (GBH).

La biomasse a été quantifiée avec l'équation allométrique suivante :

Biomasse = α × (hauteur de la canopée) β

Où :

α et β sont des coefficients optimisés pour mieux correspondre à la relation entre les variables de télédétection, comme indiqué dans l'Inventaire National Forestier Français, conformément aux recommandations de Næsset (2002) et Dubayah (2013), qui ont démontré l'utilisation de facteurs de conversion pour estimer les attributs forestiers à partir des données de CHM dérivées de LiDAR.

Modèle Numérique de Terrain (DEM) :

Un modèle numérique de terrain (DEM) du Golf National. Cela est parfois appelé modèle numérique d'élévation (DTM). Cependant, ils ne sont pas toujours identiques. Les valeurs représentent l'élévation du terrain au-dessus du niveau de la mer. L'altitude du site varie de 152 à 174 m.

Modèle Numérique de Surface (DSM) :

Un modèle numérique de surface (DSM) du Golf National, incluant les canopées des arbres et de la végétation.

Modèle de Hauteur de Canopée (CHM) :

Un ensemble de données raster produit en soustrayant le modèle numérique de terrain (DEM) du modèle numérique de surface (DSM). L'objet le plus élevé s'élève à près de 27 m au-dessus du sol.

Distribution de la végétation :

C'est la proportion du sol recouverte par les canopées des plantes lorsqu'elles sont vues d'en haut. Une valeur élevée indique généralement une végétation plus dense et plus haute, ce qui est corrélé à des niveaux de biomasse plus élevés, par exemple en raison d'un feuillage accru.

Cette carte a été générée avec l'extraction de deux classes : la végétation haute, qui consiste principalement en chênes, charmes, aulnes, peupliers, robiniers, saules et sapins, et la végétation moyenne, qui occupe principalement la partie extérieure de la zone et comprend des arbustes, des peupliers, des genêts et des roses sauvages.

« On estime que le Golf National séquestre environ 150 tonnes d'équivalents CO_2 par an dans la biomasse aérienne » (Page 208)

Quantification du carbone :

Selon les normes de l'industrie, le carbone de la biomasse aérienne (AGB) est estimé à un facteur de 0,47 du poids sec de la biomasse aérienne. En général, la technologie LiDAR est considérée comme plus précise et pertinente pour des sites d'étude à l'échelle des parcours de golf. Les résultats satellites pour 2022 montrent des valeurs environ 20% plus élevées que celles obtenues par LiDAR pour la même année.

Cela soulève l'hypothèse que la méthode satellitaire pourrait entraîner une surestimation de la biomasse dans cette même proportion. Les raisons de cette différence peuvent inclure une extraction incorrecte des classes de végétation, qu'elle soit surévaluée ou sous-évaluée.

Lorsqu'on ajuste pour la surévaluation spéculée de la biomasse par la méthode satellitaire par rapport à LiDAR, l'augmentation annuelle moyenne du carbone de la biomasse aérienne est de 42,5 ± 56,1 tonnes. La variabilité dans le changement annuel produit un écart-type supérieur à la valeur réelle.

Conversion en équivalents CO_2
L'augmentation annuelle moyenne est convertie en équivalents CO_2 en multipliant cette valeur par un facteur de 3,67, représentant la différence de masse moléculaire, ce qui donne 155,98 ± 205,89 tonnes. À partir de cela, on estime que le Golf National séquestre environ 150 tonnes d'équivalents CO_2 par an dans la biomasse aérienne. Cependant, il existe une variabilité considérable dans le changement annuel de la biomasse qui se reflète dans l'écart-type.

Encore une fois, à titre de simple spéculation, une tendance linéaire de ce taux produirait une valeur de séquestration de carbone de 7 500 t/CO_2e sur une période de 50 ans.

« Avec la séquestration du carbone, le golf et les parcours de golf ont une opportunité unique de se positionner comme un sport, une industrie, une entreprise et un type d'utilisation des terres à faibles émissions de carbone. »

Discussion (Page 211)

Des recherches antérieures indiquent que les parcours de golf séquestrent du carbone, du moins dans les couches supérieures du sol, durant leurs premières décennies avant d'atteindre un certain niveau de saturation ou d'équilibre. De plus, il est affirmé que les parcours de golf peuvent être des puits de carbone. Un puits de carbone est défini comme tout processus, activité ou mécanisme qui retire un gaz à effet de serre (GES), un aérosol ou un précurseur d'un GES de l'atmosphère (Nations Unies, 1992).

Pour être considéré comme un puits de carbone, un parcours de golf doit séquestrer plus de carbone que les gaz à effet de serre qu'il émet. Les émissions sont généralement sous-estimées. Les sources d'émissions les plus couramment négligées sont la construction et le transport des clients. Les parcours de golf ne pourraient guère exister sans ces facteurs, et par conséquent, un rapport complet sur les gaz à effet de serre devrait les inclure.

En théorie, un parcours de golf peut agir comme un puits de carbone, à condition que sa pérennité soit assurée, malgré les changements d'utilisation des terres de plus en plus fréquents dans notre époque moderne. Par ailleurs, certains parcours de golf sont connus pour avoir été aménagés principalement en tondant la végétation existante.

Un tel terrain pourrait récemment avoir adopté des tondeuses électriques alimentées par des sources d'énergie renouvelable, remplaçant ainsi l'utilisation de combustibles fossiles. Situé dans un cadre rural, au sein d'une petite ville, il pourrait être principalement fréquenté par des habitants locaux, se rendant sur place sur de courtes distances, dans la limite de l'autonomie électrique de leur voiture hybride. Par exemple, de tels terrains sont probablement présents en Islande ou dans d'autres régions de Scandinavie.

Cependant, les émissions de gaz à effet de serre devraient être considérablement réduites à l'avenir, grâce à une prise de conscience croissante et aux innovations technologiques, tandis que les connaissances sur l'optimisation de la séquestration du carbone continueront de progresser. Il est donc probable que le nombre de parcours de golf atteignant une neutralité carbone augmentera.

Il est important de souligner que le concept de parcours de golf comme puits de carbone, ou de parcours de golf à zéro émission nette, reste une hypothèse théorique. Ce qui est certain, c'est qu'avec la séquestration, le golf et les parcours de golf disposent d'une opportunité unique pour se positionner comme un sport, une industrie, une entreprise et un type d'utilisation des terres à faibles émissions de carbone.

Voici un ensemble de lignes directrices pratiques pour les propriétaires de parcours de golf et les organismes de réglementation, visant à les aider à atteindre cet objectif.

Recommandations

En plus de l'objectif évident de lutter contre le changement climatique pour le bien de tous, l'action climatique peut offrir de multiples avantages aux propriétaires de parcours de golf et aux autres parties prenantes du mouvement golfique. Ceux-ci incluent, mais ne se limitent pas à, ce qui suit :

Réduction des coûts
Un parcours de golf à faibles émissions de carbone peut bénéficier de plusieurs avantages financiers directs, car il devient un client et un fournisseur plus attractif en amont et en aval de sa chaîne de valeur. Par exemple, lorsqu'un parcours de golf à faibles émissions achète du matériel, le fabricant peut faire état d'émissions de portée 3 réduites en aval. Il en va de même pour une banque qui finance le club pour l'achat de cet équipement. Les banques sont désormais de plus en plus tenues de rendre compte de métriques telles que les émissions par euro prêté. Les deux fournisseurs devraient bénéficier d'économies directes grâce à leurs coûts d'atténuation réduits, en plus de profiter des avantages de réaction en chaîne de portée 3 en amont et en aval.

Plus de revenus

Il en va de même pour les clients du parcours de golf, en particulier les sponsors potentiels et les entreprises souhaitant louer le terrain pour une journée pour leurs employés ou clients. Un facteur d'émission plus faible associé au produit de jouer au golf sur le parcours est susceptible d'augmenter les ventes. Cela le rend plus attractif pour les sorties d'entreprise et les parrainages. Les entreprises souhaitent être associées à des organisations qui prennent des mesures climatiques crédibles. Par conséquent, une initiative à faible émission de carbone d'un parcours de golf, ou de toute entreprise, est susceptible d'entraîner un effet d'entraînement dans la nouvelle économie carbone en développement.

Aujourd'hui, lorsque nous achetons des produits, nous avons de plus en plus la possibilité de consulter en ligne leurs facteurs d'émission, que nous pouvons ensuite intégrer dans notre comptabilité climatique. Ces informations font partie de ce que l'on appelle les analyses du cycle de vie (ACV). Cette tendance soulève une question intéressante pour les propriétaires de parcours de golf : quel est l'ACV d'une adhésion ou d'un green fee, c'est-à-dire l'impact environnemental concret d'un parcours ? Faut-il viser plus de membres et de clients payant un green fee, ou plutôt le même nombre de clients prêts à payer un supplément pour une offre plus durable ?

Gestion des risques

Préparez-vous à la réglementation et restez en avance sur le jeu : réduisez le risque de gestion de crise. Les gouvernements mettent en place de nouvelles réglementations obligeant les organisations et les entreprises à divulguer des informations sur leur empreinte carbone, une exigence qui s'inscrit dans une économie émergente de plus en plus axée sur la durabilité.

Incitations financières

Vous pouvez être éligible à des incitations financières.

Amélioration des perceptions

Une image améliorée, corrigeant les idées reçues sur le golf et les parcours de golf, devrait faciliter l'obtention des permis de planification, favoriser la participation des autorités gouvernementales et améliorer la compréhension générale. Cela inclut également le public, qui exerce une pression croissante sur les parcours de golf dans le cadre de la densification urbaine.

Rapport sur les gaz à effet de serre

Émissions

Étape 1 : Déterminer une année de référence
Effectuer un inventaire des émissions de gaz à effet de serre et du carbone dans le sol et la biomasse aérienne.

Émissions

Mesurer les émissions.
Commencez par le Scope 1 et 2, car le Scope 3 est plus difficile à évaluer. En effet, très peu de produits disposent d'analyses du cycle de vie (ACV), et cela ne devrait pas changer dans un avenir proche. En attendant, vous pouvez utiliser l'ACV de produits similaires pour estimer un facteur d'incertitude. Il est également recommandé de se référer aux directives de l'ADEME. À titre d'exemple, vous pouvez consulter le cas de Mérignies.

Remarque :
Le restaurant n'est pas une partie intégrante du produit lié au golf.
Rapporter les émissions par produit.
Jouer sur le parcours de golf est un produit.
Acheter un pantalon est un autre produit. Cette vente ne se serait jamais produite sans le parcours de golf.

Étape 2 : Fixer un objectif de réduction des émissions et un calendrier
Une organisation peut communiquer cet objectif.

Séquestration
Effectuer un inventaire du carbone du sol et de la biomasse aérienne (AGB), avec des méthodes telles que celles décrites dans ce document.
L'estimation de la biomasse par séries temporelles à l'aide d'une combinaison de ressources et de méthodes de télédétection est un bon début, car elle fournit un aperçu des changements approximatifs au fil du temps.
Concevoir un plan d'échantillonnage du sol. Identifier les zones présentant une combinaison unique de type de sol, d'historique d'utilisation des terres, de niveau de perturbation due à la construction et d'approches de gestion. Faire appel à un tiers reconnu pour collecter et analyser les échantillons de sol et faire rapport sur le stock de carbone organique du sol.
Réaliser un inventaire des espèces végétales, définir des parcelles d'échantillonnage, mesurer le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) des arbres échantillonnés et utiliser ces informations pour quantifier le carbone de l'AGB à l'aide d'équations allométriques. Inclure des photographies géoréférencées des mesures de DBH.
Commencer petit est mieux que de ne rien faire. L'essentiel est de décrire clairement les méthodes, les limites et les contraintes du travail, afin qu'il puisse être ajouté et répété par d'autres au sein de l'organisation ultérieurement.

Insetting : Dans le cadre de la déclaration des gaz à effet de serre ou de la comptabilité climatique/carbonique, une organisation peut signaler la séquestration de carbone qui se produit sur sa propriété, dans sa chaîne de valeur, et soustraire cela de ses émissions opérationnelles de gaz à effet de serre pour obtenir des émissions nettes.
Cela est clairement stipulé dans la série de normes ISO 14064 sur la déclaration des gaz à effet de serre au niveau organisationnel.
Inversement, lorsqu'il s'agit de délivrer et de vendre des crédits ou unités de carbone vérifiés sur des marchés volontaires du carbone, d'autres exigences sont introduites.
Les crédits de carbone sont conçus pour aider à financer des actions climatiques qui, autrement, ne se produiraient probablement pas. Ils sont achetés par ceux qui cherchent à compenser leurs émissions, comme un moyen de financer des projets climatiques qui ne présentent pas de sens commercial pour les investisseurs ou les banques.
Un établissement de golf peut théoriquement obtenir des crédits de carbone pour un nouveau projet ayant des limites claires, comme une action de reforestation par exemple. De plus, en théorie, le développement d'un nouveau parcours de golf pourrait être financé par des crédits carbone, à condition qu'il soit démontré que ce parcours n'aurait pas été développé autrement.

Dans ce cas, la séquestration doit être considérée dans le contexte de ce qui se serait passé dans le scénario habituel, si l'établissement de golf n'avait pas été développé. Si l'utilisation des terres précédente avait montré qu'elle continuait à séquestrer du carbone, cela doit être déduit de la séquestration de carbone enregistrée pour le parcours de golf. C'est le concept d'addition. La séquestration doit être démontrée comme étant additionnelle. Il n'est pas suffisant de seulement déclarer la séquestration nette.
Les projets AFOLU (Agriculture, Forêt et Autres Utilisations des Terres) couvrent généralement une période de 50 ans. Pour qu'un tel projet soit rentable, il faut viser au moins 10 000 crédits ou unités (CO_2e). Un crédit de carbone, également appelé unité de carbone, est équivalent à un équivalent CO_2.

Réduire la consommation
La consommation en général, utiliser moins, faire moins, mais délivrer plus. Moins, c'est plus. Soyez créatif. Pensez en dehors des sentiers battus.
L'action climatique peut aider à expliquer diverses initiatives qui contribuent également à économiser de l'argent et à prioriser les ressources vers les domaines du produit golfique qui font la plus grande différence, par exemple, garder un nombre modeste de bunkers de sable, éviter un mobilier de parcours écrasant, *etc*.

Transition énergétique
Transition des combustibles fossiles à l'électricité, bien que cela dépende de la source d'électricité.
Adoption précoce des équipements de parcours de golf électriques récents et prometteurs, à condition qu'ils puissent fonctionner avec de l'énergie renouvelable, même produite sur place, par exemple, de petites éoliennes et des panneaux solaires.

Éviter la perturbation
Aération, carottage, *etc*.

Éviter la compaction
Minimiser la compaction implique de comprendre la relation entre la densité apparente (BD) et le pourcentage de carbone organique dans le sol (SOC%). Il s'agit peut-être moins de mesures réactives, telles que l'aération et d'autres techniques perturbatrices, et davantage de pratiques proactives. Cela inclut la conception et la gestion du trafic, afin d'assurer une distribution optimale du trafic compactant et de limiter l'usure.

Fertilisation de précision
Appliquez uniquement ce que la plante a réellement besoin. Cela permet de minimiser les émissions de protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le CO_2. Une tendance générale vers une réduction de l'utilisation de l'azote sur les fairways a été observée.

Irrigation
Meersman et al. (2012) ont rapporté que l'utilisation des terres et les précipitations sont les variables les plus importantes derrière le carbone organique dans le sol en France. Cela suggère que l'irrigation peut être considérée dans une nouvelle perspective plus large, en fonction de la source d'eau et de l'énergie utilisée pour l'appliquer. Audit d'irrigation. Optimiser le système d'irrigation. Efficacité de la station de pompage.

« Bien que la réduction du pourcentage de carbone organique dans le sol (SOC) à court terme puisse se produire, le surfaçage avec du sable peut augmenter la capacité de stockage à long terme. » (Page 222)

Top Dressing

Le surfaçage avec du sable est principalement pratiqué sur les greens. Ceux-ci ont été exclus de ce rapport en raison de leur petite taille par rapport à l'échelle des sites d'étude, ainsi que de leur gestion visant à maintenir un contenu organique stable.

Le surfaçage avec du sable a été rapporté comme une source d'émissions. Cela est généralement vrai, en ce qui concerne l'extraction du sable dans une carrière, son transport et son application sur la surface du gazon.

Cependant, cela néglige certains processus qui peuvent se produire après l'application. Le surfaçage avec du sable est similaire aux dépôts éoliens en géologie, c'est-à-dire le transport de sol à travers les terres. Ceux-ci contribuent à l'ajout d'un nouveau milieu dans le profil du sol, dans lequel une nouvelle séquestration peut se produire.

Cela dilue le pourcentage de SOC à court terme, mais augmente le potentiel de stockage du sol à long terme.

Au Golf National, un programme extensif de surfaçage avec du sable a été exécuté sur les fairways du parcours de l'Albatros, dans les années précédant la Ryder Cup en 2018. Des pourcentages de SOC et des stocks plus bas ont été observés dans les 30 cm supérieurs des fairways de l'Albatros, et dans certaines zones de roughs entretenus, comparativement à son parcours frère de l'Aigle.

Cela peut être mis en balance avec les émissions liées à l'extraction, au transport et à l'application.

De plus, sur certains parcours de golf, le sable de surfaçage peut être disponible par d'autres moyens que ceux des carrières. Dans de tels cas, le surfaçage avec du sable peut être bénéfique, non seulement d'un point de vue traditionnel de l'entretien des greens, mais aussi dans le contexte de la séquestration du carbone.

Bien que le pourcentage de SOC soit réduit à court terme, le surfaçage avec du sable peut augmenter la capacité de stockage à long terme.

Construction

Le Golf National et Mérignies sont des exemples de parcours de golf qui ont été construits avec des terres excédentaires provenant de projets de construction à proximité, qui auraient autrement été transportées sur de plus longues distances pour être éliminées.

De cette manière, le développement de l'installation de golf a pu contribuer à l'évitement des émissions. Premièrement, en recevant cette terre, le Golf National a réduit cette distance de transport, évitant ainsi les émissions de gaz à effet de serre qui se seraient autrement produites. Deuxièmement, la construction du parcours de golf a garanti que cette terre soit éliminée, stabilisée et réhabilitée rapidement. Un effort similaire, à un autre endroit de décharge, aurait également entraîné des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

C'est un exemple suggérant que, hypothétiquement, un parcours de golf peut être développé avec des émissions nettes négatives. Les émissions évitées grâce à la réduction de la distance de transport des terres excédentaires des projets de construction à proximité peuvent compenser d'autres émissions de construction sur le site du parcours de golf. Cela réduit l'empreinte du développement, amortie sur, par exemple, 50 ans.

Cela augmente les chances que la séquestration de carbone dans le sol et la biomasse aérienne puisse compenser ces émissions liées au cycle de vie et à l'exploitation. Ces scénarios sont hypothétiques.

Utilisation de la terre importée pour réduire les émissions héritées

Un guide étape par étape pour utiliser la terre importée afin de réduire les émissions héritées :

Commencez par conserver la couche arable des zones où cette terre serait autrement perdue sous une épaisse couche de terre importée.

Concevez le site du parcours de golf pour inclure de la terre importée sur diverses zones périphériques, autour et entre les trous de golf.

Tracez des chemins de transport, lorsque cela est possible, le long de chemins permanents, de routes d'entretien ou de rues dans le design final. Intégrez l'utilisation de ces chemins pendant la construction dans le processus de développement du design.

Ne construisez pas d'aires de jeu importantes avec cette terre, ni sur de grandes quantités de remblai avec un matériau quelconque, car cela n'augmente que le risque de perte de matériau inégale ou de tassement au fil du temps. Construisez ces zones avec de la terre locale, autant que possible et dans la mesure dictée par les normes de l'industrie. Les greens, les abords et les départs sont normalement construits avec du sable et du gravier importés.

Le contractant qui obtient l'autorisation de transporter et d'éliminer ce sol excédentaire peut soit payer directement le développeur du parcours de golf, soit convenir de fournir un certain nombre d'heures-machine pour recevoir, manipuler et façonner le nouveau terrain avec la terre importée, selon ce qui est le plus pratique.

Organisez la construction de manière que la machine réceptrice, généralement un bulldozer plutôt qu'une excavatrice, manipule régulièrement le sol éliminé, le poussant loin de l'endroit où les camions peuvent reculer et le décharger. Chaque fois qu'il y a une pause entre les chargements de camions, l'opérateur du bulldozer peut facilement conduire la machine sur une courte distance jusqu'à un trou de golf voisin, pour façonner les fairways, les greens, les abords, les départs, les bunkers, les lacs, *etc*.

De cette façon, le facteur d'efficacité de la machine réceptrice est simplement augmenté. Le coût est à peu près le même, quel que soit le nombre de chargements de camions. Autrement dit, la machine et l'opérateur sont liés au site toute la journée, tous les jours. La seule différence marginale réside dans la consommation d'huile et le coût. Cependant, le façonnage des caractéristiques du parcours de golf n'est généralement pas une tâche très énergivore dans le contexte des travaux de terrassement au bulldozer.

Gestion des attentes des golfeurs

Cela nécessite un effort collectif à tous les niveaux du mouvement golfique : des amateurs aux clubs, en passant par les fédérations nationales et les organismes de gouvernance mondiaux. Cela commence par le haut niveau, avec les grands championnats. Il est important qu'ils montrent un éloignement de la culture du gazon impeccable qui a commencé devant les châteaux des aristocrates français et anglais.

Il ne s'agit pas seulement de se concentrer sur le prochain régime fiscal, mais d'avoir une vue d'ensemble. Le golf est un jeu mondial. Il est crucial de veiller à ce qu'il reste ainsi et devienne

plus inclusif et accessible. Cela contribuera certainement à la pérennité et à la durabilité des entreprises de fabrication d'équipements de golf.

L'année dernière, pour la première fois, plus de personnes ont pratiqué des formes alternatives de golf en dehors du parcours plutôt que sur celui-ci.

Un leadership à point de bascule permet de maximiser l'impact tout en minimisant l'effort. Il est essentiel de choisir des lieux prestigieux pour les grands championnats et de tirer parti du temps d'antenne pour diffuser leur histoire.

Il serait également pertinent de produire un manuel destiné aux membres des comités de gestion, afin de clarifier ce que signifie assumer cette responsabilité aujourd'hui.

Biodiversité, de défi à opportunité :

En revenant à Harari et à son bref historique des pelouses, la culture de la pelouse impeccable qu'il décrit s'expose à la critique, car le gazon géré sur les parcours de golf est en quelque sorte une monoculture. Un tapis de gazon uniforme, propre et vert a été la fierté des gestionnaires de pelouse depuis longtemps.

Selon l'étude de pâturage de Þórhallsdóttir et Guðmundsson (2023) mentionnée précédemment, les prairies pâturées montrent des indicateurs de carbone et de biodiversité plus élevés que celles qui ne le sont pas. C'est dans ce contexte de biodiversité que notre commentaire antérieur, selon lequel la tonte imite le pâturage, atteint ses limites.

L'animal pâturant exerce une certaine sélection naturelle en broutant de manière sélective. D'autres plantes que l'herbe peuvent coexister. Une tondeuse, en revanche, coupe tout, encourageant une couverture uniforme de gazon. Maintenant, avec l'émergence de la robotique, l'utilisation de capteurs, d'indices NDVI et d'autres outils ouvre soudain une pléthore d'options.

En commençant par les zones enherbées, une tondeuse robotisée pourrait tondre uniquement l'herbe qui, autrement, deviendrait trop haute pour faciliter le jeu de golf, tout en laissant d'autres plantes dans le couvert végétal, produisant ainsi un milieu plus diversifié dans de vastes zones où seule une petite partie du golf est pratiquée.

C'est ici que la gestion des attentes des golfeurs devient cruciale pour maximiser la contribution du golf à deux des plus grands défis de l'humanité à l'avenir : le changement climatique et la biodiversité.

Une gestion réussie de ces attentes est susceptible d'accroître les avantages du golf, tandis que l'accent est mis dans cette direction, bénéficiant finalement aux golfeurs, qui apprécieront eux-mêmes une plus grande diversité de parcours de golf parmi lesquels choisir.

Conclusions

Le stock total de carbone organique du sol (SOC) en 2023 sur les trois sites étudiés était de 6 900 tonnes (t) au Mérignies Golf & Country Club, de 8 730 t au Golf Bluegreen Bordeaux-Lac et de 8 149 t au Golf National, sans inclure les zones boisées de tous les sites.

En supposant un taux linéaire d'accumulation du SOC à partir de stocks de différents âges au sein du même site, la séquestration annuelle dans les fairways et les zones enherbées tondues, combinées en tant que gazon géré, est de 1,85 t/SOC/ha/an entre les âges de 9 à 15 ans à Mérignies et de 0,50 t/SOC/ha/an entre les âges de 34 à 45 ans à Bordeaux-Lac. Ce dernier chiffre est plus spéculatif, car les deux zones comparées diffèrent par leur niveau de perturbation du sol lors de la construction.

Carbone au-dessus du sol :
Le carbone au-dessus du sol estimé au Golf National était de 888 tonnes en 2023. Une estimation par télédétection suggérait une accumulation annuelle moyenne de 42,5 t/C, soit 156 t d'équivalents CO_2, bien que très variable.

Répartition en profondeur :
Le SOC total moyen dans le gazon géré sur toutes les zones d'étude était de 118,9 t/ha. 47 % se trouvaient dans les 30 premiers centimètres, 28 % à une profondeur de 30 à 60 cm et 25 % à 60-100 cm, où la profondeur de carottage moyenne était de 88 cm, soit 28 cm dans la troisième et la plus basse couche.

Valeur d'utilisation des terres :
Le stock de SOC dans le gazon géré pour chacune des trois zones d'étude a été comparé aux valeurs de référence issues de bases de données pour les terres arables et les prairies dans les régions pertinentes de France. Les résultats suggèrent qu'à mesure que les zones de gazon géré vieillissent, leurs stocks de SOC s'améliorent par rapport à ces valeurs de référence. Par exemple, le parcours de l'Albatros, âgé de 33 ans au Golf National, présente des niveaux de SOC similaires à ceux des terres arables de la région, tandis que le parcours La Jalle, âgé de 45 ans au Bordeaux Lac, approche des valeurs des prairies.

Variabilité et potentiel de stockage :
Un fort écart-type dans le pourcentage de SOC et le stock dans le gazon suggère que le plan d'échantillonnage du sol a réussi à capturer la variabilité qui existe sur les parcours de golf. Cela indique également un fort potentiel de séquestration du SOC, en accord avec le projet 4 pour 1000 de la France, qui vise à augmenter le pourcentage de SOC de 0,4 % par an.

Enfin, cela met en évidence l'importance de recherches complémentaires, qui peuvent être un sous-produit de la déclaration des gaz à effet de serre par les propriétaires de parcours de golf.

Limitations et recherches futures.

Limitations
À Mérignies, il est rapporté que 30 cm de sol topographique préexistant ont été conservés avant que le sol importé ne soit étendu sur le site. Des enregistrements verbaux indiquent que seulement 20 cm de ce matériau conservé ont été redistribués, ce qui signifie que la couche de profondeur 1 traverse cela et pourrait éventuellement entrer dans un sol importé d'origine inconnue.
Une décision a été prise de ne pas collecter d'échantillons de sol dans les zones boisées ou immédiatement contre les bordures des bois. La variabilité perçue de ces zones a été jugée trop importante pour le côté pratique du projet, y compris l'accès à l'équipement de prélèvement de sol et le budget. L'accent a été mis sur des zones uniques aux parcours de golf. Dans cet exercice, il a été accepté que, si nécessaire, le SOC dans les zones boisées pourrait être estimé en utilisant des valeurs de référence de base de données.
L'étude a exclu les greens, les abords des greens, les départs et les plans d'eau.
La chaume n'a pas été prise en compte dans la quantification de la biomasse.
Le nombre d'échantillons de sol et de couches de profondeur analysées a été déterminé en tenant compte d'un budget prédéterminé pour le projet.
Aucun échantillon de sol n'a été collecté sur les terres environnantes pouvant représenter l'utilisation des terres antérieure aux parcours de golf.
Aucun échantillon de sol n'a été collecté ni analysé pour la texture du sol, le pH et les nutriments.
Une discussion prévue sur une étude parallèle sur les stocks de carbone et la biodiversité dans les prairies permanentes, par le MNHN, n'a pas encore été publiée.
Un écart-type doit encore être noté aux côtés des différentes valeurs rapportées.
Le projet FORMS par Shwartz et al. est prévu dans une discussion ultérieure.
Une nouvelle ligne de métro est proposée dans le coin Sud-Ouest du site de Golf National. Plusieurs échantillons de sol ont été ajoutés dans cette zone. Aucune discussion supplémentaire n'a été rédigée.

Recherches futures

Carbon Par suit le développement d'un protocole d'échantillonnage, en tenant compte de la variabilité découverte dans le carbone organique des sols des parcours de golf, de la différence minimale détectable (MDD) et des évaluations de puissance statistique selon les exigences décrites dans les normes, les protocoles de déclaration des gaz à effet de serre et les marchés de carbone volontaires (VCMs).

Datation au radiocarbone
Combustion par étapes, analyse thermogravimétrique et utilisation d'isotopes, y compris la datation au radiocarbone.

Mesures de flux
Mesures de flux pour comprendre la nitrification et la dénitrification des résidus de tonte.

Recherche financée par l'industrie
La première étape dans l'effort d'une organisation pour réduire ses émissions de carbone est de déterminer une année de référence et de quantifier ses émissions pour cette période. Cela inclut la réalisation d'un inventaire du carbone dans le sol. Tant que cela inclut un échantillonnage stratifié, des courbes de séquestration du carbone par type de sol, espèce de

gazon, climat et gestion peuvent être développées et améliorées au fil du temps, en tant que sous-produits de ces initiatives par les propriétaires de parcours de golf.

Annexe 1 : Résultats des tests de sol (Page 241)
Résultats bruts des tests effectués par Agricarbon.

Annexe 2 : Plans d'échantillonnage (Page 257)
Par Carbon Par.

Annexe 3 : Photos historiques supplémentaires (Page 265)
3.1. Mérignies
Ce sont des photographies aériennes historiques supplémentaires, téléchargées depuis le service IGN, et étudiées dans le cadre de l'analyse de l'historique d'utilisation des terres. Elles sont incluses ici, par souci d'intérêt pour la gestion des parcours de golf étudiés.

Annexe 3 : Photos historiques supplémentaires (Page 307)
3.2. Bordeaux-Lac
Ce sont des photographies aériennes historiques supplémentaires, téléchargées depuis le service IGN, et étudiées dans le cadre de l'analyse de l'historique d'utilisation des terres. Elles sont incluses ici, par souci d'intérêt pour la gestion des parcours de golf étudiés.

Annexe 3 : Photos historiques supplémentaires (Page 379)
3.3. Le Golf National
Ce sont des photographies aériennes historiques supplémentaires, téléchargées depuis le service IGN, et étudiées dans le cadre de l'analyse de l'historique d'utilisation des terres. Elles sont incluses ici, par souci d'intérêt pour la gestion des parcours de golf étudiés.

Annexe 4 : Chapitre de discussion précédent (Page 419)
4.1. Français
Ceci est la première version de l'interprétation des résultats et de la discussion, datant d'octobre 2023, traduite de l'anglais en français par Arthur Lecomte, Amandine Lucchin et Basile LENOIR pour le Fonds de dotation FFGreen.

Distribution du SOC en fonction de la profondeur (Page 420)

Tous les golfs	Golf 45 ans	Moyenne nationale
0-30 cm	45 %	47 %	59 %
30-60 cm	29 %	30 %	26 %
60-100 cm	26 %	23 %	15 %

Les deux premières colonnes comprennent les pourcentages de SOC en fonction de la profondeur obtenus pour toutes les pelouses entretenues, à l'exception des parcours d'entraînement, d'abord sur tous les sites d'étude, puis à BL La Jalle. La troisième colonne comprend la distribution moyenne de SOC en fonction de la profondeur en France. Toutes les valeurs sont des pourcentages.

Les carottes ont été extraites à 100 cm de profondeur et trois couches de 0-30, 30-60 et plus de 60 cm de profondeur ont été analysées séparément en laboratoire.

Limites
La construction de certains des parcours de golf étudiés comprenait l'utilisation de sol importé à une profondeur de plus de 30 cm. Cela empêche de tirer certaines conclusions concernant les profondeurs de 30 à 100 cm.

Par exemple :
Sur le golf de Mérignies, le parcours de Val de Marque présente considérablement plus de SOC (ou COS - carbone organique du sol) dans les 30 premiers cm que celui de Rupilly, un parcours plus jeune présent sur le même site. Cependant, ces deux zones ont approximativement la même quantité de SOC total aux profondeurs 0-100 cm.

Le parcours La Jalle du Golf Bluegreen Bordeaux Lac, construit avec un minimum de mouvements de terre, présente plus de SOC dans les 30 premiers cm que le parcours Etangs, plus jeune, sur le même site. Ce dernier ayant été façonné avec de la terre excavée pour créer des étangs, sans conserver et réétaler celle-ci, ce résultat était attendu. Par ailleurs, Etangs présente une valeur de SOC totale aux profondeurs 0-100 cm plus importante que La Jalle. Cela pourrait s'expliquer par l'enfouissement d'une partie du sol d'origine dans des couches plus profondes durant la construction du parcours, lui conférant ainsi une valeur de SOC de départ plus élevée. Il est intéressant de noter qu'un tel enfouissement du sol a récemment fait l'objet de projets de recherche, où ce processus est considéré comme une méthode prometteuse pour maximiser la capacité de stockage du carbone dans les sols.

Aucun des trois sites étudiés ne comporte deux parcours ou plus, de séries de trous ou de zones développées à des moments différents avec un mouvement similaire et minimal du sol.

Distribution en profondeur
Environ 55 % du SOC total, mesuré jusqu'à 1 m, a été trouvé à une profondeur de 30 à 100 cm. La distribution moyenne de SOC est de 45/29/26 % pour les profondeurs 0-30, 30-60 et 60-100 cm, respectivement. En comparaison, Mulder et al. (2015) ont rapporté que la teneur nationale moyenne en SOC à des profondeurs de 30 à 100 cm était d'environ 41 % du stock total dans la couche la plus superficielle de 1 m.

Superficie des Construction SOC
Pelouses entretenues

Parcours	Année de construction	Années depuis	SOC (0-30 cm) t/ha
ME Rupilly	2014	9	45,2
BL Par 3	2012	11	55,6
ME La Valutte	2010	13	56,3
ME Val de Marque	2008	15	56,9
Golf National	1990	33	51,3
BL Etangs	1989	34	61,1
BL La Jalle	1978	45	66,6

Note : Taux moyen de SOC au niveau de pelouses entretenues (fairways et roughs entretenus) par âge, dans les 30 premiers cm de sol. ME : Mérignies Golf et Country Club, BL : Golf Bluegreen Bordeaux-Lac. À l'exception du Golf National, les taux de SOC augmentent avec l'âge.

Le pourcentage total du stock de carbone organique du sol (SOC) à une profondeur de 30-100 cm est donc plus élevé d'environ 14 % dans la zone d'étude par rapport à la moyenne nationale.

Le plus ancien des parcours de golf étudiés, et le seul à avoir été entièrement développé avec un mouvement minimal du sol, est le parcours La Jalle au Golf Bluegreen Bordeaux-Lac. On y retrouve une distribution de SOC de 47/30/23 % pour les profondeurs 0-30, 30-60 et 60-100 cm, respectivement.

Différence minime entre les fairways et les roughs entretenus

On observe une faible différence de séquestration de carbone dans les sols entre les fairways et les roughs entretenus. Sur huit comparaisons, le SOC des fairways est plus élevé que celui des roughs entretenus dans quatre cas et inversement.

Les différences les plus importantes se situent sur :

- **Le parcours Albatros au Golf National**, où le SOC est plus élevé dans les roughs entretenus que dans les fairways. Cela soulève la question de l'effet de l'épandage intensif de sable sur les fairways, comme cela a été le cas pour ce parcours. En termes géologiques, l'épandage de sable peut être comparé aux dépôts éoliens, qui dilueraient le pourcentage de SOC dans la couche supérieure du sol mais augmenteraient la capacité de stockage de SOC à long terme. Dans les zones où les dépôts éoliens sont importants, le pourcentage de contenu minéral augmente et le SOC diminue (Gudmundsson, 2016).
- **Le parcours La Valutte et Rupilly**, où le SOC dans les fairways était plus élevé que dans les roughs entretenus.

Par conséquent, les comparaisons suivantes ont été effectuées avec les deux zones : fairways et roughs entretenus, combinées afin de former un ensemble de données plus robuste.

Les stocks de SOC dans les zones de gazon à gestion minimale, telles que les parcours d'entraînement, ne montrent pas de réduction notable par rapport à d'autres zones de gazon entretenues sur le même site. Cela indique que les pelouses entretenues peuvent servir de puits de carbone, d'autant plus si l'intensité de la gestion est réduite à ce qui est généralement qualifié de gestion à faible niveau d'intrants ou de gestion durable des parcours de golf.

Ceci est cohérent avec les données publiées selon lesquelles, bien qu'une gestion intensive des parcours puisse augmenter la productivité de la biomasse du gazon, elle ne garantit pas un SOC plus élevé par rapport à une gestion durable (Wang et al., 2022).

SOC 0-30 cm (t/ha) Construction (Page 422)

Golf	Gazon	Contrôle	Différence	Année de Construction	Années depuis
BL La Jalle	66,6	56,1	10,6	1978	45
ME La Valutte	56,3	47,5	8,9	2010	13
ME Val de Marque	56,3	47,5	8,8	2008	15
BL Etangs	61,1	56,1	5,1	1989	34
GN Oiselet	52,8	50,1	2,8	1990	33
GN Aigle	51,0	50,1	0,9	1990	33
BL Par 3	55,6	56,1	-0,5	2012	11
ME Rupilly	45,2	47,5	-2,3	2014	9
GN Albatros	47,7	50,1	-2,4	1990	33

Taux moyen de SOC au niveau des pelouses entretenues (fairways et roughs entretenus) par âge, dans les 30 premiers cm de sol. ME : Mérignies Golf et Country Club, BL : Golf Bluegreen Bordeaux Lac. À l'exception du Golf National, les taux de SOC augmentent avec l'âge.

Accumulation de SOC dans les 30 cm supérieurs en fonction de l'âge

Les zones de pelouse entretenues sur les trois sites étudiés sont âgées de 9, 11, 13, 15, 33, 34 et 45 ans. À l'exception du Golf National, il existe une corrélation entre l'accumulation de SOC dans les 30 premiers centimètres de sol et l'âge de la zone d'étude. Plus la zone est ancienne, plus le stock de SOC est élevé.

Sans considérer les facteurs tels que le type et l'origine du sol, les régimes de gestion du parcours, la situation géographique et les conditions climatiques, les résultats indiquent une accumulation continue de SOC jusqu'à au moins 34 ans à partir de l'établissement du gazon.

Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, compte tenu de la différence de construction des deux zones d'étude les plus anciennes, les parcours La Jalle et Etangs à Bordeaux-Lac. En raison de la méthode utilisée pour construire le parcours Etangs, une partie du sous-sol d'origine peut s'être retrouvée dans la couche supérieure du sol, ce qui peut lui

conférer une valeur de SOC initiale plus faible en 1989 que ce n'était le cas pour La Jalle en 1978.

S'il y a effectivement eu une accumulation de SOC entre 34 et 45 ans depuis l'établissement du gazon, la durée de séquestration de carbone par celui-ci correspondrait à une période plus longue que ce qui a été suggéré dans certains articles scientifiques récents.

Sur l'ensemble des sites, et sans tenir compte des facteurs externes précédemment mentionnés, à long terme, le taux moyen d'accumulation de SOC peut être estimé à 0,53 tonne par hectare et par an dans les 30 premiers centimètres. De même, pour des périodes plus courtes, les comparaisons au sein des trois parcours de neuf trous à Mérignies indiquent une accumulation de 2,79 t SOC/ha/an entre 9 et 13 ans après l'établissement, et 1,85 t SOC/ha/an entre 9 et 15 ans. On observe une différence minime entre les parcours La Valutte et Val de Marque âgés respectivement de 13 et 15 ans.

Valeurs de SOC relativement faibles au Golf National

Les valeurs de SOC au Golf National sont relativement faibles, à la fois aux profondeurs de 0-30 et 0-100 cm. Le nombre de carottes d'échantillonnage ayant atteint la profondeur complète, le nombre de carottes prélevées au Golf National était moins élevé que sur les deux autres sites d'étude. Seul 39 % des carottes prélevées au Golf National incluaient la troisième couche de profondeur, 60-100 cm, contre 47 % et 79 % à Mérignies et à Bordeaux Lac, respectivement.

Il en va de même pour la couche intermédiaire, 30-60 cm. 66 % des carottes au Golf National incluaient cette profondeur, contre 75 % et 98,5 % à Mérignies et Bordeaux-Lac, respectivement. La profondeur moyenne des carottes était de 59,0 cm, 62,2 cm et 82,1 cm au Golf National, à Mérignies et à Bordeaux Lac, respectivement.

Si les faibles valeurs de SOC observées au Golf National ne sont pas expliquées par des facteurs géologiques, géographiques et climatiques, il est important de considérer l'impact de l'entretien du parcours, en particulier sur les espèces de graminées composant les gazons. Le Golf National présente essentiellement des graminées des prés, tandis que Mérignies est composé davantage de fétuques. Beard (1989) rapporte que, parmi les graminées de saison froide et de saison chaude, les fétuques et les chiendents, respectivement, sont des espèces de graminées avec les racines les plus profondes. Au contraire, les graminées des prés, comme le pâturin annuel (*Poa annua*), présentent un système racinaire réduit.

Meersmans et al. (2012) ont montré que la moyenne nationale française pour les 30 premiers cm de sol dans les prairies était de 85,65 t/ha. En couplant ces données aux valeurs nationales moyennes de SOC en fonction de la profondeur publiées par Mulder et al. (2015), on peut estimer le SOC restant à des profondeurs plus importantes. On obtient ainsi un stock moyen de SOC de 145,64 t/ha dans les 100 premiers centimètres. Le stock total de SOC dans les 100 premiers cm du plus jeune parcours de Bordeaux-Lac, Etangs (34 ans), était de 162,04 t/ha. Le stock de SOC dans les 30 premiers centimètres dans la même zone était de 61,13 t/ha, inférieur à celui de La Jalle (66,62 t/ha, plus vieux de 11 ans). L'accumulation de SOC sur le parcours Etangs devrait donc se poursuivre, surtout dans les 30 premiers centimètres de sol. Cela démontre la capacité de certains systèmes de gazon entretenus, notamment sur parcours de golf, à séquestrer le carbone et à servir de puits de carbone, potentiellement en égalant ou en dépassant la capacité de stockage les prairies. C'est l'une des nombreuses raisons mise en avant par cette étude qui justifie un suivi avec un second inventaire dans environ cinq ans.

Carbon Par