

Abstrait

La lutte contre la dégradation des éléments nutritifs du sol et le réchauffement climatique nécessite de nouvelles solutions. L'amélioration de l'altération à l'aide de roches basaltiques concassées est une stratégie prometteuse à double action qui peut améliorer la santé du sol et séquestrer le dioxyde de carbone. Cette étude examine les effets à court terme de l'amendement basaltique sur l'avoine de printemps (*Avena sativa* L.) pendant la saison de croissance 2022 dans le nord-est de l'Angleterre. Le plan expérimental comprenait quatre blocs avec des parcelles témoins et amendées au basalte, et deux types de culture dans chaque traitement, disposés selon un plan en parcelles divisées. Le basalte (18,86 tonnes ha⁻¹) a été incorporé au sol pendant le semis. Des échantillons de tissus, de céréales et de sol ont été prélevés pour l'analyse du rendement, des éléments nutritifs et du pH. L'amendement basaltique a conduit à des rendements significativement plus élevés, avec des augmentations moyennes de 20,5 % et 9,3 % dans les parcelles en semis direct et labourées, respectivement. Le pH du sol était significativement plus élevé 256 jours après l'application de roches pour tous les types de culture (semis direct : en moyenne 6,47 contre 6,76 et labouré : en moyenne 6,69 contre 6,89, pour les parcelles témoins et amendées au basalte, respectivement), probablement en raison de la dissolution rapide des minéraux dans le basalte appliqué, comme la calcite. Les indications des différences de pH du sol au cours de la saison de croissance sont observées par la mesure directe de la plus faible absorption de manganèse et de fer chez les plantes cultivées sur un sol amendé au basalte. Une plus grande absorption de potassium dans les grains et les tissus et de calcium dans les tissus a été observée dans les cultures traitées au basalte. Notamment, aucune accumulation d'éléments potentiellement toxiques (arsenic, cadmium, chrome, nickel) n'a été détectée dans les grains, ce qui indique que les cultures cultivées à l'aide de cette matière première basaltique sont sans danger pour la consommation. Cette étude indique que les amendements basaltiques peuvent améliorer les performances agronomiques des sols agricoles argilo-limoneux sableux dans des conditions climatiques tempérées. Ces résultats offrent des informations précieuses pour les producteurs des régions tempérées qui envisagent d'utiliser de tels amendements, démontrant le potentiel d'amélioration des rendements des cultures et des avantages environnementaux tout en garantissant la sécurité des cultures.

Citation : Skov K, Wardman J, Healey M, McBride A, Bierowiec T, Cooper J, et al. (2024) Avantages agronomiques initiaux de l'amélioration de l'altération grâce au basalte : une étude de l'avoine de printemps dans un climat tempéré. PLoS ONE 19(3) : e0295031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031>

Editeur : Timothy Omara, BOKU : Universitat fur Bodenkultur Wien, AUTRICHE

Reçu : 19 mai 2023 ; **Accepté :** 14 novembre 2023 ; **Publié :** 27 mars 2024

Droits d'auteur : © 2024 Skov et al. Il s'agit d'un article en libre accès distribué selon les termes de la [licence Creative Commons Attribution](#), qui autorise l'utilisation, la distribution et la reproduction sans restriction sur n'importe quel support, à condition que l'auteur original et la source soient mentionnés.

Disponibilité des données : Les données sont partagées dans le référentiel public Zenodo : [10.5281/zenodo.8158681](https://zenodo.org/record/8158681).

Financement : La conception de l'étude et la collecte des données de rendement ont été menées par l'Université de Newcastle, indépendamment des bailleurs de fonds du projet. Les bailleurs de fonds (UNDO Carbon Ltd) ont participé à toutes les autres collectes de données (y compris l'échantillonnage du sol et des tissus végétaux) et à l'analyse, menées en collaboration avec l'Université de Newcastle. La décision de publier et la préparation du manuscrit ont été prises en collaboration entre l'Université de Newcastle et UNDO Carbon Ltd. UNDO Carbon Ltd. a

fourni un soutien sous forme de salaires à Kirstine Skov, Jez Wardman, Matthew Healey, Amy McBride, Tzara Bierowiec, Ifeoma Edeh, Melissa J. Murphy, Ryan Pape, Will Turner, Peter Wade, Mike Kelland, Jim Mann et Xinran Liu. Les rôles spécifiques de ces auteurs sont articulés dans la section « contributions des auteurs ».

Introduction

Les carences en nutriments dans les sols agricoles représentent un défi mondial et constituent une préoccupation majeure pour le maintien et l'augmentation des rendements des cultures, garantissant ainsi la sécurité alimentaire pour nourrir la population humaine croissante [[1](#)]. De plus, la disponibilité de nouvelles terres agricoles est limitée [[2](#)] et les effets du changement climatique devraient entraver la production alimentaire [[3](#)]. L'altération améliorée (EW) des roches silicatées peut contribuer à garantir la sécurité alimentaire, grâce aux avantages agronomiques résultant de la libération de nutriments dérivés des roches [[4](#), [5](#)]. L'EW a également été proposée comme une technologie prometteuse et évolutive d'élimination du dioxyde de carbone (CDR) avec le potentiel mondial de séquestrer des gigatonnes de dioxyde de carbone atmosphérique [[5](#), [6](#)].

Français L'utilisation de roches silicatées concassées, telles que le basalte, comme amendement du sol sur les terres cultivées est associée à une série d'avantages agronomiques [[7](#) – [9](#)]. Des études remontant aux années 1960 [[10](#), [11](#)] et 1930 [[12](#), [13](#)] révèlent le potentiel d'augmentation du rendement et d'amélioration du sol suite à l'application de roches basaltiques concassées sur les sols agricoles et forestiers. Cependant, certaines études utilisant de la poussière de roche volcanique n'ont montré que peu ou pas d'avantages agronomiques [[14](#)]. Dans cet essai particulier [[14](#)], le type de roche utilisé n'a pas été décrit, et bien qu'il ne semble pas être basaltique en raison de sa teneur élevée en fer, cette étude a peut-être eu une influence pour dissuader l'intérêt pour l'utilisation agricole du basalte concassé. Cependant, des avantages évidents pour la croissance des plantes ont été démontrés dans des expériences plus rigoureuses [[15](#)], dans lesquelles la roche concassée a été bien définie comme basaltique en raison de sa composition chimique et minéralogique. Les roches mafiques, telles que le basalte, sont définies minéralogiquement comme contenant des minéraux du groupe du pyroxène et du plagioclase [[16](#)] et chimiquement comme contenant < 52 % en poids de SiO₂ et < 5 % en poids d'oxydes de métaux alcalins (Na₂O et K₂O) [[17](#)]. Selon ces définitions, la composition des roches mafiques peut présenter des variations substantielles selon les emplacements géographiques et les âges géologiques [[16](#), [18](#)]. Cette variabilité rend extrêmement importante la caractérisation de la minéralogie et de la chimie de chaque roche utilisée dans les expériences.

Jusqu'à très récemment, l'intérêt pour les avantages agronomiques du basalte était limité ; l'utilisation de ce type de roche dans les études EW a fourni une nouvelle et urgente incitation à des essais rigoureux qui étudient les effets sur la croissance des cultures. Le basalte peut être riche en minéraux qui libèrent des macro- (par exemple, calcium, magnésium, silicium, potassium, phosphore, soufre, mais à l'exclusion de l'azote) et des micro-nutriments (par exemple, cuivre, fer, manganèse, molybdène et zinc) pendant la dissolution qui sont essentiels à la croissance des plantes [[4](#) - [6](#)]. Les roches silicatées concassées ont un potentiel considérable pour améliorer les carences en potassium et en micronutriments, suite au décapage des nutriments des sols agricoles [[9](#)]. Certains de ces micronutriments sont redox-actifs, ce qui en fait des cofacteurs importants dans les processus enzymatiques, métaboliques et cellulaires [[19](#)]. De plus, ces micronutriments participent activement à la fixation de l'azote et à la photosynthèse [[20](#), [21](#)].

Une plus grande disponibilité des éléments nutritifs du sol peut conduire à une augmentation des rendements des cultures. Une étude de synthèse [9] a constaté une augmentation significative des rendements dans 19 des 34 articles évalués par des pairs. Cependant, la majorité (c'est-à-dire 14) de ces études ont été menées sur des sols acides et fortement altérés dans les régions tropicales. En comparaison, les études sur les sols tempérés ont montré des preuves moins définitives de gains de rendement, à l'exception des expériences où des minéraux à altération plus rapide (par exemple la néphéline et le mica biotite) ont été appliqués. Des améliorations des rendements du maïs et de la pomme de terre ont également été signalées récemment dans une étude utilisant de la farine de roche glaciaire dans le climat tempéré du sud du Danemark [22].

Bien que les macro- et micro-nutriments soient présents dans les roches silicatées, ils ne sont pas immédiatement disponibles pour l'absorption par les plantes ; ils ne deviennent disponibles qu'après dissolution du minéral. Le taux de libération plus lent des nutriments peut cependant être une caractéristique positive des amendements de roches silicatées par rapport aux engrais conventionnels (synthétiques), car cela peut réduire la probabilité de lessivage des nutriments ou de ruissellement de surface qui peuvent ensuite contaminer les eaux souterraines et les cours d'eau [8]. Des simulations utilisant un modèle de transport réactif et la composition minéralogique de six fines de carrière basaltique disponibles dans le commerce suggèrent que certains basaltes ont le potentiel de libérer suffisamment de phosphore pour remplacer l'application moyenne d'engrais phosphatés aux cultures labourées au Royaume-Uni et aux États-Unis après un an [18].

Français L'avantage agronomique potentiel le plus marqué de la roche silicate concassée comme amendement du sol est probablement l'effet neutralisant sur le pH dans les sols acides, en raison des produits alcalins générés par la dissolution des minéraux [4]. L'augmentation du pH dans les sols acides augmente généralement la disponibilité des nutriments des plantes en réduisant la formation de composés nutritifs insolubles causés par l'acidification du sol [4], augmentant ainsi potentiellement le rendement des cultures. Des études antérieures ont constaté des augmentations du pH allant d'une unité de pH relativement modeste de 0,2 jusqu'à 2 unités de pH sur des sols où le pH de départ était d'environ 4,5 [9 , 23 , 24] après l'application de roche concassée.

Bien que les roches silicatées contiennent de nombreux éléments essentiels à la nutrition des cultures, la libération et l'accumulation d'oligo-éléments potentiellement toxiques (ETP) constituent une considération importante lorsque des amendements EW sont appliqués aux sols agricoles [25]. Certains ETP sont des micronutriments bénéfiques pour les plantes à de faibles concentrations, mais deviennent potentiellement nocifs à des concentrations élevées [25]. L'accumulation de nickel et de chrome dans le sol est particulièrement préoccupante en raison des risques potentiels d'effets nocifs sur l'environnement et la santé humaine [25]. Les concentrations de nickel et de chrome dans les minéraux ultramafiques comme l'olivine (environ 1 300 et 2 300 mg kg⁻¹, respectivement, [26]) ont suscité des inquiétudes particulières en ce qui concerne l'application sur les terres agricoles [27 , 28]. Bien que les concentrations soient d'un ordre de grandeur inférieur dans le basalte [29], les concentrations de nickel peuvent dépasser la limite fixée par l'UE pour les amendements du sol (100 mg kg⁻¹ [30]), en particulier si la roche provient de la province ignée de l'Atlantique Nord [25]. Les roches silicatées peuvent également contenir des traces d'autres éléments potentiellement dangereux, tels que l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb [31].

La santé des sols est un élément essentiel de l'efficacité de l'agriculture et a fait l'objet d'une attention accrue ces dernières années en raison de décennies de pratiques agricoles intensives qui ont conduit à la dégradation des sols [32]. Un nombre croissant d'agriculteurs modifient leurs pratiques de gestion des champs, passant du labourage au semis direct/sans labour, afin de réduire l'érosion des sols et de maintenir leur fertilité naturelle. Les deux types de culture ont des implications sur les conditions physiques et biologiques du sol et peuvent donc influencer le taux de dissolution du basalte. Le semis direct constitue la base des approches de culture sans labour, qui consistent à planter les graines directement dans le sol avec une perturbation réduite de la surface du sol [33]. Le labour, en revanche, est une forme de travail du sol plus invasive, qui consiste à retourner le sol afin de l'ameublir, de briser les mottes et d'incorporer de la matière organique. Par rapport au labourage, le semis direct peut améliorer la santé du sol et donc le rendement, en augmentant considérablement l'abondance des vers de terre et la capacité du sol à retenir la matière organique et les nutriments du sol [33 , 34]. Cependant, selon le type et l'état du sol, le semis direct et le labourage peuvent tous deux entraîner un compactage de la couche arable, avec une profondeur de pénétration des racines réduite [35] et une perte de rendement en conséquence [36 , 37]. Dans cette étude, l'effet de l'amendement basaltique est évalué sur les parcelles semées directement et labourées.

En tant que technologie CDR terrestre, l'application d'amendements EW aux terres agricoles devrait être hautement évolutive en raison de l'abondance [38] et de la disponibilité du basalte [39]. Cependant, le déploiement réussi à grande échelle de l'EW dépend de la volonté des propriétaires fonciers d'accorder l'accès à leurs terres ou d'appliquer eux-mêmes le basalte. La proposition de valeur de l'EW en tant que technologie CDR pour les propriétaires fonciers est susceptible de s'améliorer lorsque sa pratique sûre et ses avantages agronomiques positifs, notamment en termes de rendement des cultures et de pH du sol, sont démontrés dans des conditions de climat, de sol, de culture et de culture similaires à celles rencontrées par les agriculteurs eux-mêmes. Cette étude visait à étudier les effets agronomiques de l'amendement basaltique sur le rendement des cultures (avoine de printemps, *Avena sativa* L.), l'absorption des nutriments et du PTE ainsi que le pH du sol, au cours de la première saison de croissance dans un climat tempéré. L'essai a été réalisé sur deux types de cultures courants dans une zone agricole intensive du nord-est de l'Angleterre, au cours de la saison de croissance 2022.

Méthodes

Description du site

Français L'étude a été réalisée à la ferme Nafferton, gérée par l'université de Newcastle, située dans le nord-est de l'Angleterre, au Royaume-Uni (54°59'07"N, 1°53'59.4"O). Tous les permis d'échantillonnage ont été obtenus auprès de l'université de Newcastle. Le sol est principalement classé comme un Stagnosol Dystrique uniforme [40], avec une texture de sol limono-argileux sableux (sable : 60,5 %, limon : 22,5 % et argile : 17,0 %) [41]. Le sol est légèrement acide (pH moyen en 2011 de 6,3) [41], avec un stock moyen de carbone organique du sol de 60,64 ±0,9 MgC ha⁻¹ [40]. Le champ présente un léger gradient d'ouest en est, avec une pente correspondant à 2,8 % parallèlement aux parcelles. Le site est situé dans le sous-type climatique de la classification climatique de Köppen « climat de la côte ouest marine » [40]. Les données de la station météorologique (de 2002 à 2022) ont été enregistrées sur place, à l'aide d'une station météorologique automatique ([S1 Fig](#)).

Conception expérimentale

L'essai a été mené sur les parcelles de la ferme consacrées à la production d'aliments de qualité à faible apport d'intrants (QLIF). Ces parcelles ont été initialement établies en 2001 et ont toujours été utilisées pour étudier les différences entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle (par exemple [41]). Le dispositif expérimental comprend quatre blocs, chacun contenant une seule réplique de quatre traitements différents, dont deux étaient pertinents pour cette étude : les parcelles témoins et les parcelles amendées au basalte (Fig. 1). Dans le cadre de la plateforme QLIF, les parcelles témoins sont gérées selon les pratiques commerciales standard. Deux types de culture différents sont imbriqués dans chaque traitement : semis direct/sans labour et labourage, voir Fig. 1 .

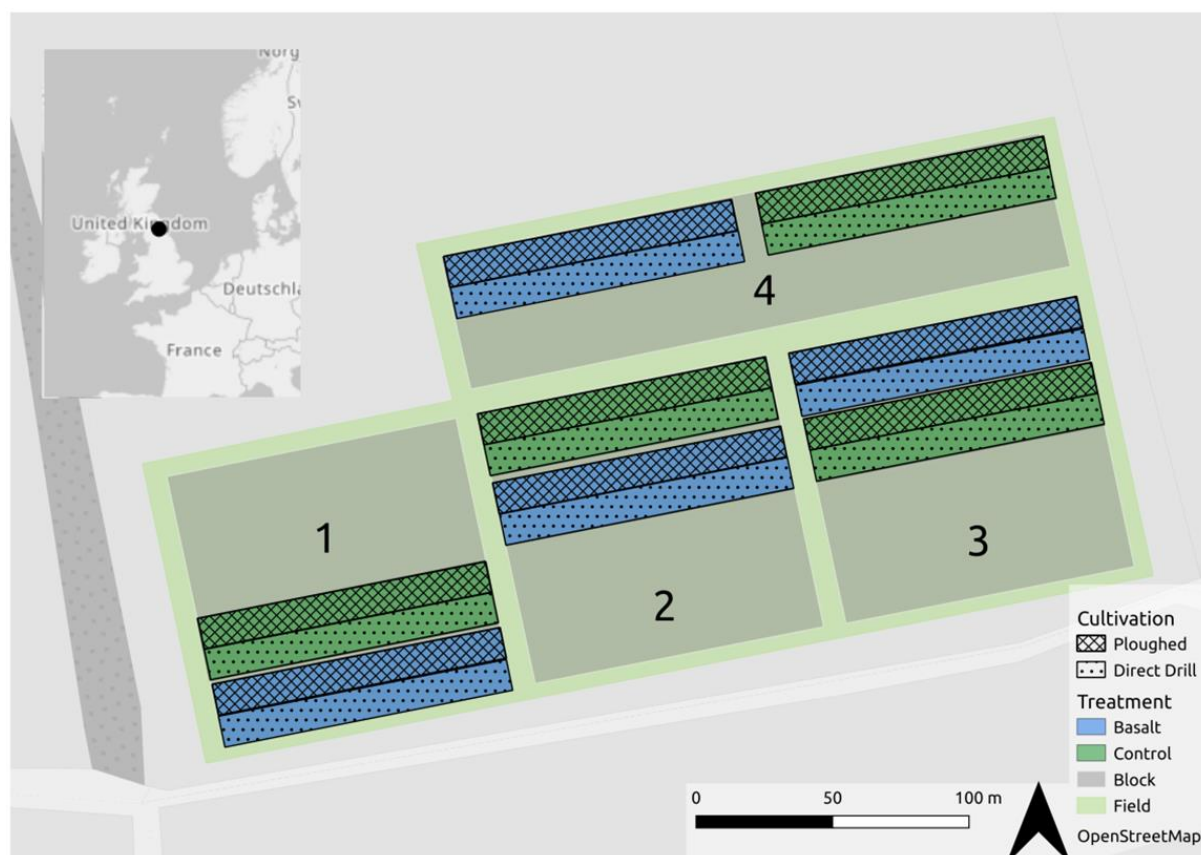


Fig 1. Conception de la parcelle expérimentale.

Le site comprend quatre blocs (gris transparent), chacun mesurant 96 x 96 mètres. Dans chaque bloc, il y a deux traitements : les parcelles témoins (vert) et les parcelles amendées au basalte (bleu). Pour chaque traitement, il existe deux types de culture : semis direct/sans labour (pointillé) et labour (hachuré). Chaque parcelle de culture mesure 12 x 96 mètres. Contexte : OpenStreetMap. Encart : emplacement de la ferme de recherche de Nafferton dans le nord-est de l'Angleterre, superposé sur OpenStreetMap.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.g001>

Gestion de terrain

Français Au cours de la saison de croissance 2022, de l'avoine de printemps [42] a été cultivée sur les parcelles. Les champs labourés ont été labourés à une profondeur de 15 à 30 cm à la fin du mois de mars, suivis d'une presse dans les trois jours (à l'aide de Simba Unipress). Le basalte a été appliqué le 12 avril 2022 à l'aide d'un épandeur de chaux agricole conventionnel. Bien que le taux d'application cible ait été fixé à 20 tonnes ha⁻¹, car il s'agit de la livraison maximale

que l'épandeur commercial pouvait atteindre en un seul passage, le taux d'épandage moyen réel a été déterminé à 18,86 tonnes ha⁻¹. Le labour a été effectué avant l'application du basalte, par conséquent, le basalte a été exclusivement incorporé à la profondeur de semis dans les deux types de culture. Aucun autre effort n'a été fait pour incorporer le basalte dans le sol, car des méthodes commerciales ont été utilisées pour garantir que le processus représente avec précision les opérations à l'échelle de l'exploitation. Les parcelles témoins et les parcelles amendées au basalte ont été fertilisées avec de l'urée nitrate d'ammonium liquide (UAN) NitroFlow le 27 avril 2022, avec un taux d'application de 246 L ha⁻¹, fournissant 75,5 kgN ha⁻¹ et 23,6 kgS ha⁻¹. Les parcelles ont en outre été traitées avec des applications conventionnelles d'herbicides et de fongicides ([annexe S1](#)).

Le taux de semis pour les deux types de culture était de 180 kg ha⁻¹, les graines ayant été semées dans le sol à l'aide d'un semoir John Deere 750A à une profondeur cible de 2 cm le 15 avril 2022. Pour les parcelles semées directement et labourées, les lits de semences ont été roulés dans les deux jours (à l'aide d'un rouleau Cambridge). Tous les champs ont été récoltés le 16 septembre 2022 à l'aide d'une moissonneuse-batteuse (Deutz-Fahr M660).

Échantillonnage et analyse du sol

Français Des échantillons de sol ont été prélevés les 1er et 2 février 2023, avant toute activité de gestion pour la saison de croissance imminente. Historiquement, chaque parcelle de culture était divisée en plusieurs traitements différents, avec quatre sous-parcelles régulièrement espacées [[43](#)]. Ces sous-parcelles ont été abandonnées en 2017, mais afin d'éviter tout biais potentiel hérité du passé dans le pH du sol, quatre échantillons de sol ont été prélevés dans chaque sous-parcelle pour l'étude actuelle, ce qui donne un nombre total de 16 échantillons de sol de chaque parcelle de culture, 64 échantillons de chaque bloc et 256 échantillons au total. Les échantillons ont été prélevés à une profondeur de 15 cm et séchés pendant cinq jours à 40 °C. Les échantillons ont ensuite été tamisés pour obtenir la fraction < 2 mm et analysés pour le pH en utilisant un rapport de mélange de sol à H₂O de 1:2,5. Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH/conductomètre Metrohm 914.

Échantillonnage de tissus végétaux et de grains

L'échantillonnage des tissus végétaux a été réalisé le 1er août 2022, en collectant 100 feuilles de la tige entièrement déployées sur la ligne centrale de chacune des 16 parcelles. Les cultures étaient au stade de croissance 77-81 au moment de l'échantillonnage, juste avant le début de la sénescence. Les échantillons frais ont été emballés dans des sacs en plastique à fermeture éclair, stockés à température ambiante et expédiés pour analyse en laboratoire le jour même. Les échantillons ont été reçus au laboratoire le 3 août 2022. Les échantillons de tissus ont été séchés à 60 °C et broyés à moins de 1 mm.

Les échantillons de tissus préparés ont été analysés pour déterminer la teneur en nutriments suivante : calcium, magnésium, manganèse, bore, cuivre, molybdène, fer, zinc, soufre, phosphore et potassium, à l'aide d'une digestion par micro-ondes à l'acide nitrique et d'une détermination élémentaire par spectrométrie d'émission optique à plasma inductif (ICP-OES). La teneur en azote des échantillons de tissus a été déterminée à l'aide de la méthode Dumas et de l'instrumentation LECO Trumac (Lancrop Laboratories, communication personnelle).

Français Le rendement en grains a été déterminé à l'aide d'une moissonneuse-batteuse (Deutz-Fahr M660), conduite sur une bande de 2,1 m le long de la ligne médiane de chaque parcelle, avec des échantillons de grains prélevés pendant la moissonneuse-batteuse le 16 septembre

2022. Dans chaque parcelle, quatre sous-échantillons d'environ 100 g chacun ont été prélevés manuellement à intervalles réguliers dans la moissonneuse-batteuse, fusionnés en un échantillon composite, séchés à l'air à 30 °C et stockés dans des sacs à fermeture éclair avant d'être expédiés pour analyse le 1er novembre 2022. Les échantillons ont été analysés pour la même série de nutriments et d'azote que les échantillons de tissus (voir ci-dessus), ainsi que pour la silice. De plus, les échantillons de grains ont été analysés pour les PTE suivants : arsenic, cadmium, chrome, plomb, mercure et nickel. Les PTE et la silice ont été déterminés à l'aide d'une digestion à l'eau régale assistée par micro-ondes et d'une détermination élémentaire par ICP-OES (Lancrop Laboratories, communication personnelle).

Des échantillons de tissus végétaux et de grains ont été analysés à l'aide du service d'accréditation du Royaume-Uni (UKAS) et des laboratoires Lancrop accrédités ISO (ISO/IEC 17025:2017).

Basalte

Français Le basalte utilisé dans cette étude provenait de la carrière de Divet Hill (55,1003°N, -2,03459°O ; Northumberland, Royaume-Uni). La composition du basalte a été déterminée à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX) pour la minéralogie, de la fluorescence X (DRX) pour la composition des oxydes et de l'ICP-OES et de l'ICP-MS pour la composition élémentaire (tableaux 1 à 3). Pour plus d'informations sur la caractérisation du basalte, voir l'annexe S2. La minéralogie du basalte est cohérente avec les interprétations identifiées dans [44], qui ont identifié des produits d'altération hydrothermale (quartz, calcite) et d'altération de l'augite (en chlorite et smectite). En l'absence de microscopie électronique à balayage-spectroscopie dispersive en énergie (SEM-EDS), il n'a pas été possible de déterminer la composition chimique de la ou des phases amorphes. Cependant, [44] indique que le talc apparaît en association avec l'altération du pyroxène, et que celui-ci et d'autres minéraux argileux, s'ils sont peu cristallins, peuvent contribuer à la composante amorphe.

Phase, identified from XRD	Mineral formula	Acid rate constant	Neutral rate constant	wt. %
<i>Faster dissolving silicate phases</i>				
Andesine	$\text{Na}_{0.7-0.5}\text{Ca}_{0.3-0.5}\text{Al}_{1.3-1.5}\text{Si}_{2.7-2.5}\text{O}_8$	-8.88	-11.47	38.5
Augite	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$	-6.82	-11.97	16.8
Amphibole	$(\text{Na},\text{Ca},\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-7.00 ^a	-10.3 ^a	1.2
<i>Medium dissolving silicate phases</i>				
Chlorite + chlorite/smectite	$(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH})_6$	-11.11 ^b	-12.52 ^b	7.8
Illite+mica	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})_2(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_{4-6}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_4$	-11.85 ^c	-13.55 ^c	7.3
<i>Slower dissolving silicate phases</i>				
Quartz	SiO_2	-13.40	-16.29	11.4
Smectite	$(\text{Ca},\text{Na})_{0.25-0.33}(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_{2-3}((\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	-10.98	-12.78	1.4
<i>Non-silicate phases identified</i>				
Calcite	CaCO_3	-0.30	-5.81	3.6
Ilmenite	FeTiO_3	-8.35	-11.16	2.5
<i>Un-known silicate phases</i>				
Amorphous	-	-	-	9.6
Total	-	-	-	100.1

^a hornblende dissolution rate used for amphibole rates provided here

^b chlorite dissolution rate constants used for chlorite + chlorite/smectite rates provided here

^c muscovite dissolution rate used for illite+mica rates provided here

Proportions of each mineral provided is in wt.%. Where minerals form in solid solution, general mineral formulas are provided. Acid and neutral rate constants represent log(dissolution rate) at 25 °C. These constants are taken from [45].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t001>

Tableau 1. Minéralogie du basalte de Divet Hill déterminée par DRX.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t001>

Compound	wt. %
SiO ₂	50.02
Al ₂ O ₃	13.59
Fe ₂ O ₃	13.02
CaO	8.97
MgO	5.32
TiO ₂	2.35
Na ₂ O	2.34
SO ₃	0.91
K ₂ O	0.87
P ₂ O ₅	0.28
MnO	0.18
BaO	0.05
SrO	0.05
Cr ₂ O ₃	0.01
Total	97.96
LOI	2.17

The detection limit of all oxides is 0.01%.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t002>

Tableau 2. Composition chimique du basalte de Divet Hill, déterminée par XRF.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t002>

Element	Unit	Analytical range	EU inorganic soil improver limits	Divet Hill
Ag	mg kg ⁻¹	0.5–100		<0.5
Al	%	0.01–50		7.06
As	mg kg ⁻¹	5–10000	40	<5
Ba	mg kg ⁻¹	10–10000		360
Be	mg kg ⁻¹	0.5–1000		1
Bi	mg kg ⁻¹	2–10000		<2
Ca	%	0.01–50		5.99
Cd	mg kg ⁻¹	0.5–1000	1.5	0.6
Co	mg kg ⁻¹	1–10000		42
Cr	mg kg ⁻¹	1–10000	2 (Cr VI)	60
Cu	mg kg ⁻¹	1–10000	300	66
Fe	%	0.01–50		8.69
Ga	mg kg ⁻¹	10–10000		20
Hg	mg kg ⁻¹	-	1	0.011
K	%	0.01–10		0.72
La	mg kg ⁻¹	10–10000		20
Li	mg kg ⁻¹	10–10000		-
Mg	%	0.01–50		2.99
Mn	mg kg ⁻¹	5–100000		1295
Mo	mg kg ⁻¹	1–10000		1
Na	%	0.01–10		1.67
Ni	mg kg ⁻¹	1–10000	100	55
P	mg kg ⁻¹	10–10000		1280
Pb	mg kg ⁻¹	2–10000	120	9
S	%	-		0.37
Si	mg kg ⁻¹	-		23.4
Sb	mg kg ⁻¹	5–10000		<5
Sc	mg kg ⁻¹	1–10000		26
Sr	mg kg ⁻¹	1–10000		391
Th	mg kg ⁻¹	20–10000		<20
Ti	%	-		1.38
Tl	mg kg ⁻¹	10–10000		<10
U	mg kg ⁻¹	10–10000		<10
V	mg kg ⁻¹	1–10000		300
W	mg kg ⁻¹	10–10000		<10
Zn	mg kg ⁻¹	2–10000	800	137
Se	mg kg ⁻¹	-		-

All elements were determined using ICP-OES, except mercury which was determined using ICP-MS. EU inorganic soil improver limits are included for the elements where these are specified [30].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t003>

:

Tableau 3. Détermination par ICP-OES et ICP-MS de la composition élémentaire du basalte de Divet Hill.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t003>

Français Les données des analyses chimiques (ICP-OES et XRF) sont cohérentes entre elles (différence < 0,42 % en poids) et les données XRF et XRD sont comparables entre elles, lorsque l'on compare la stœchiométrie minérale aux deux méthodes d'analyse chimique. En utilisant la classification TAS [17] et les données d'oxyde de XRF ([Tableau 2](#)), le matériau de Divet Hill est classé comme ayant une composition chimique de basalte. La taille des particules varie de 0 à 4 mm avec une taille médiane des particules de 1147 µm ([Annexe S2](#)).

Analyse statistique

Français Un modèle linéaire à effets mixtes (LMEM) a été utilisé pour évaluer si l'effet du traitement du basalte et du type de culture était statistiquement significatif (suivant [46]). Les facteurs de traitement et de culture ont été inclus comme termes d'effet fixe et le facteur de bloc comme terme d'effet aléatoire, ce dernier pour tenir compte de l'hétérogénéité spatiale entre les blocs. Les hypothèses du modèle concernant la normalité et l'homoscédasticité de la variance des résidus ont été testées à l'aide des tests de Shapiro-Wilk [47] et du multiplicateur de Lagrange de White, respectivement. Lorsque les résidus du modèle ne répondent pas aux hypothèses du LMEM, les données ont été transformées par Box Cox pour déterminer la signification des effets fixes. L'effet d'interaction potentiel des effets fixes a été étudié à l'aide d'un LMEM, mais en général aucun effet d'interaction n'a été trouvé. Pour le pH, l'analyse statistique a été effectuée sur les valeurs de pH mesurées ainsi que sur l'antilogarithme de la valeur de pH négative, en utilisant la concentration en ions hydrogène non transformés comme variable continue [48]. Les résidus du modèle ont également été évalués pour la normalité et la variance à l'aide d'une estimation de la densité du noyau, d'un quantile-quantile (QQ) et de diagrammes de dispersion. L'effet de l'amendement du basalte a également été évalué à l'aide de tests non paramétriques de Wilcoxon et Kruskal-Wallis. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de Python (version 3.9) et du package Statsmodels (version 0.13.2) [49].

Résultats**Rendement en grains**

Français Un rendement significativement plus élevé dans les parcelles amendées au basalte a été observé pour tous les types de culture (en moyenne 20,5 % et 9,3 % pour les parcelles en semis direct et labourées, respectivement), ainsi qu'un rendement plus élevé dans les parcelles labourées par rapport aux parcelles en semis direct (Tableaux 4 et 5 , [Fig. 2](#)). Le poids moyen de mille grains dans chaque groupe était sensiblement similaire (allant de 41,14 à 41,59 g), ce qui indique que les différences significatives dans le rendement en grains n'étaient pas dues à des grains plus gros ou plus lourds, mais plutôt à un plus grand nombre de grains. Il convient également de noter qu'une variance plus élevée a été observée dans les parcelles en semis direct par rapport aux parcelles labourées ([Fig. 2](#)).

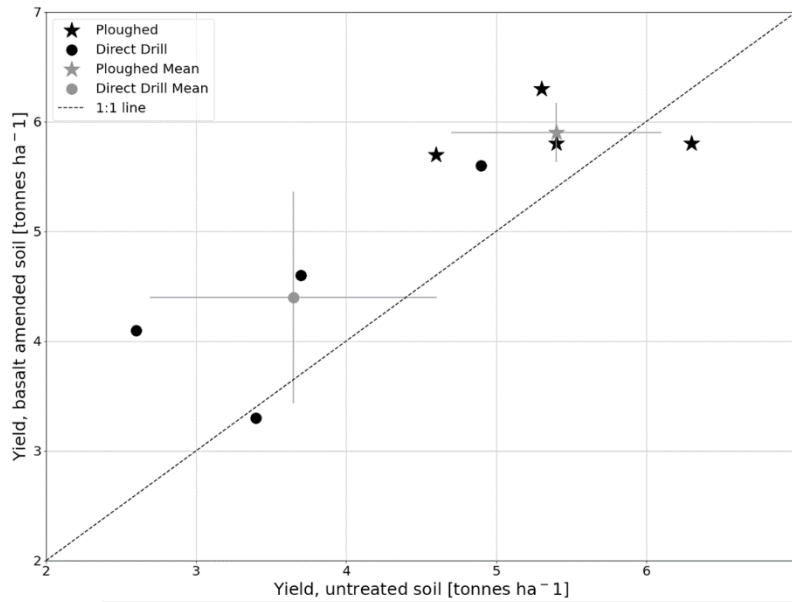


Fig 2. Données de rendement.

Rendement des parcelles amendées avec du basalte comparé au rendement des parcelles non traitées, appariées en fonction du type de culture et du numéro de bloc. Le rendement moyen des deux types de culture est visualisé avec l'écart type comme barres d'erreur. La ligne pointillée indique la ligne 1:1.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.g002>

		Units	Control + Direct Drill		Basalt + Direct Drill		Control + Ploughed		Basalt + Ploughed	
			M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Soil	pH		6.47	0.30	6.76	0.37	6.69	0.29	6.89	0.25
Grain	Yield	t ha ⁻¹	3.65	0.95	4.4	0.96	5.4	0.7	5.9	0.27
	TGW	g	41.51	1.67	41.59	1.64	41.81	2.05	41.14	2.37
	Nitrogen	%	2.23	0.02	2.10	0.15	2.00	0.10	1.99	0.07
	Phosphorus	%	0.40	0.04	0.41	0.04	0.37	0.03	0.38	0.04
	Potassium	%	0.42	0.04	0.44	0.04	0.39	0.03	0.42	0.03
	Sulfur	%	0.19	0.01	0.19	0.01	0.18	0.01	0.18	0.00
	Calcium	%	0.12	0.01	0.12	0.01	0.11	0.01	0.11	0.01
	Magnesium	%	0.14	0.01	0.14	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01
	Boron	mg kg ⁻¹	0.96	0.11	1.02	0.14	0.87	0.12	0.98	0.05
	Copper	mg kg ⁻¹	5.88	0.22	5.45	0.39	4.95	0.31	5.10	0.24
	Iron	mg kg ⁻¹	57.05	4.68	58.97	6.61	57.98	3.54	57.83	2.71
	Manganese	mg kg ⁻¹	42.60	6.96	35.30	5.24	43.40	1.87	42.20	6.23
	Molybdenum	mg kg ⁻¹	0.15	0.09	0.23	0.08	0.14	0.03	0.17	0.08
	Silica	mg kg ⁻¹	181.50	32.44	218.00	12.19	206.50	37.60	201.25	30.50
Zinc	mg kg ⁻¹	39.48	3.85	36.68	3.51	32.22	3.04	32.30	1.61	
Grain PTEs	Arsenic	mg kg ⁻¹	0.08	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.16	0.08
	Cadmium	mg kg ⁻¹	0.05	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01
	Chromium	mg kg ⁻¹	4.19	0.47	4.24	0.4	4.18	0.1	3.91	0.52
	Nickel	mg kg ⁻¹	2.97	0.33	2.84	0.22	3.03	0.45	2.82	0.21
Tissue	Nitrogen	%	2.7	0.16	2.42	0.05	1.92	0.16	2.02	0.22
	Phosphorus	%	0.14	0.03	0.13	0.01	0.12	0.01	0.12	0.01
	Potassium	%	1.26	0.14	1.38	0.18	1.57	0.27	1.71	0.11
	Sulfur	%	0.58	0.03	0.58	0.05	0.37	0.03	0.4	0.05
	Calcium	%	1.42	0.12	1.58	0.07	1.41	0.1	1.5	0.09
	Magnesium	%	0.24	0.01	0.23	0.02	0.19	0.03	0.21	0.03
	Boron	mg kg ⁻¹	11.13	1.08	11.83	0.19	9.9	1.1	10.6	0.34
	Copper	mg kg ⁻¹	5.95	0.62	5.3	0.14	4.03	0.46	4.05	0.26
	Iron	mg kg ⁻¹	96.25	6.85	87	6.38	88.25	9.64	81.5	4.65
	Manganese	mg kg ⁻¹	21.33	4.91	15.93	3.46	26.05	11.7	15.3	3.37
Molybdenum	mg kg ⁻¹	0.51	0.09	0.66	0.19	0.63	0.21	0.54	0.2	
Zinc	mg kg ⁻¹	12.5	1	11.75	0.96	9.25	0.5	9.5	1.29	

The grain samples were also analysed for the potentially toxic elements (PTEs) mercury and lead, but levels were below detection, and hence, data for these elements are not included in this table.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t004>

Tableau 4. Moyenne (M) et écart type (ET) de chaque paramètre déterminé dans chaque combinaison de traitement et de type de culture (n = 4).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t004>

		Units	Cultivation	Basalt
Soil	pH		<0.001	<0.001
Grain	Yield	t ha ⁻¹	<0.001	0.015
	TGW	g	0.933	0.753
	Nitrogen	%	<0.001	0.135
	Phosphorus	%	0.005	0.320
	Potassium	%	0.008	0.008
	Sulfur	%	<0.001	0.670
	Calcium	%	0.059	0.637
	Magnesium	%	0.206	0.527
	Boron	mg kg ⁻¹	0.034	0.007
	Copper	mg kg ⁻¹	<0.001	0.402
	Iron	mg kg ⁻¹	0.960	0.692
	Manganese	mg kg ⁻¹	0.051	0.031
	Molybdenum	mg kg ⁻¹	0.276	0.073
	Silica	mg kg ⁻¹	0.733	0.195
	Zinc	mg kg ⁻¹	<0.001	0.300
Grain PTEs	Arsenic	mg kg ⁻¹	0.195	0.335
	Cadmium	mg kg ⁻¹	0.036	0.675
	Chromium	mg kg ⁻¹	0.250	0.455
	Nickel	mg kg ⁻¹	0.888	0.145
Tissue	Nitrogen	%	<0.001	0.330
	Phosphorus	%	0.002	0.255
	Potassium	%	<0.001	0.014
	Sulfur	%	<0.001	0.417
	Calcium	%	0.175	<0.001
	Magnesium	%	<0.001	0.639
	Boron	mg kg ⁻¹	<0.001	0.026
	Copper	mg kg ⁻¹	<0.001	0.126
	Iron	mg kg ⁻¹	0.025	0.008
	Manganese	mg kg ⁻¹	0.700	<0.001
	Molybdenum	mg kg ⁻¹	0.973	0.660
	Zinc	mg kg ⁻¹	<0.001	0.610

Bold numbers show a significant effect of the fixed factors at a 95% confidence level. Italicised numbers are for parameters where model residuals were not normally distributed (Shapiro-Wilk p-value <0.05), the models did converge and there was homogeneity in the variance of the residuals. Tissue manganese and phosphorus were BoxCox transformed to satisfy normality and homoscedasticity of model residuals.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t005>

Tableau 5. Valeurs p pour chaque paramètre, dérivées d'une modélisation linéaire à effets mixtes avec la culture et l'amendement basaltique comme effets fixes et l'ensemble de facteurs de bloc comme effet aléatoire.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.t005>

pH du sol

Français Une tendance similaire au rendement en grains a été observée dans les données sur le pH du sol, où un pH significativement plus élevé a été observé dans le sol amendé avec du basalte, par rapport aux parcelles témoins, à la fois pour le semis direct (moyenne de 6,76 et 6,47, respectivement) et pour les parcelles labourées (moyenne de 6,89 et 6,69, respectivement) ([Tableau 4](#)). Une différence significative a également été constatée en raison du type de culture, avec un pH légèrement plus élevé dans les parcelles labourées ([Fig. 3](#) , [Tableaux 4](#) et [5](#)).

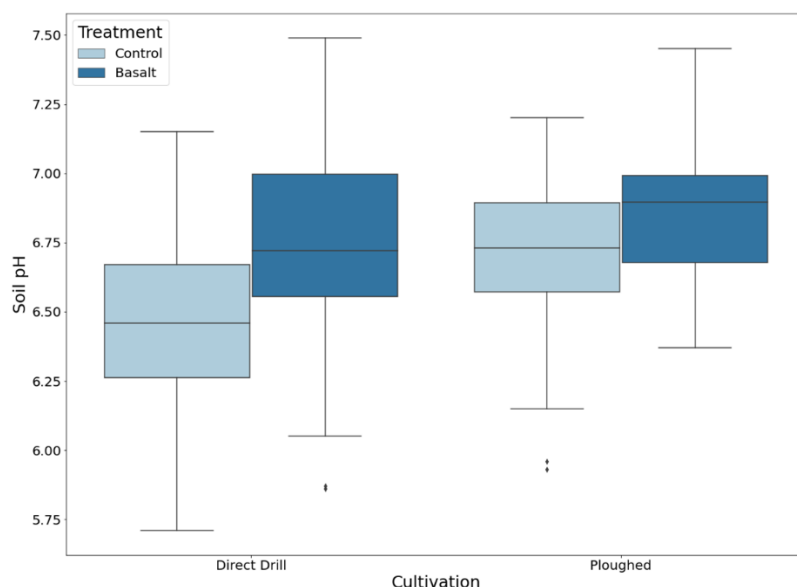


Fig 3. Données sur le pH du sol.

Diagrammes en boîtes du pH du sol des parcelles amendées au basalte et des parcelles témoins pour chaque type de culture (n = 64). Les boîtes représentent le quartile de chaque groupe, les moustaches montrent l'étendue de la distribution, les pointes de diamant ont été classées comme valeurs aberrantes. Le pH a été déterminé dans un rapport sol:H₂O de 1: 2,5 .

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295031.g003>

Nutriments des céréales

Français Des concentrations en éléments nutritifs des grains significativement plus élevées ont été observées, en raison de l'amendement basaltique pour le potassium et le bore, alors que la concentration en manganèse est significativement plus faible ([tableau 5](#)). Des concentrations en grains significativement plus faibles dans les parcelles labourées par rapport aux parcelles semées directement ont été observées pour l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre, le cuivre, le bore et le zinc ([tableau 4](#)).

Éléments potentiellement toxiques des céréales

Français Aucune accumulation statistiquement significative des concentrations de PTE n'a été constatée à la suite de l'amendement basaltique ([Tableau 5](#)). Le cuivre et le zinc ont été analysés dans le cadre de l'analyse standard des nutriments, ainsi que dans le cadre de la série PTE, mais ne sont mentionnés que dans les nutriments, car les concentrations sont bien inférieures à la toxicité ([Tableau 4](#)). Une absorption légèrement plus faible de cadmium a été observée à la suite du labourage (p<0,05, Tableaux [4](#) et [5](#)). Le plomb et le mercure ne sont pas mentionnés car les concentrations étaient inférieures à la limite de détection (0,5 mg kg⁻¹).

Nutriments tissulaires

Des concentrations tissulaires significativement plus élevées de calcium, de potassium et de bore ont été trouvées dans les parcelles amendées avec du basalte ([tableau 4](#)), tandis que des concentrations significativement plus faibles de manganèse et de fer ont été trouvées. Comme pour les concentrations en éléments nutritifs des céréales, tous les éléments nutritifs (azote, phosphore, soufre, magnésium, fer, cuivre, bore et zinc), à l'exception du potassium, étaient

significativement plus élevés dans les tissus végétaux des parcelles soumises à un semis direct par rapport aux parcelles soumises à un labour (tableaux [4](#) et [5](#)).

Discussion

L'objectif de cette étude était d'examiner les effets de l'application de basalte concassé sur les terres agricoles la première année. L'étude se concentre sur les réponses au rendement de l'avoine de printemps, sur l'absorption des nutriments et des PTE dans les tissus et les grains, ainsi que sur les différences de pH du sol entre les parcelles amendées au basalte et les parcelles témoins.

Rendement

L'amendement basaltique a montré un rendement de récolte significativement plus élevé dans les parcelles labourées et semées directement ([tableau 5](#) , [figure 2](#)). Parallèlement, la masse moyenne de mille grains dans les quatre groupes n'a pas varié, se situant entre 41,14 et 41,81 g ([tableau 4](#)), ce qui indique que le rendement plus élevé n'était pas dû à des grains plus gros ou plus lourds, mais plutôt à une plus grande abondance de grains.

Français La différence de rendement moyen due à l'amendement basaltique sur les parcelles en semis direct était de 0,75 tonne ha⁻¹ (soit 4,40 contre 3,65 tonnes ha⁻¹) et sur les parcelles labourées de 0,50 tonne ha⁻¹ (soit 5,90 contre 5,40 tonnes ha⁻¹), voir [le tableau 4](#). Cela correspond à une différence moyenne de 20,5 et 9,3 %, respectivement, bien qu'il faille noter que la variance au sein de chaque groupe était relativement importante (avec des écarts types allant de 0,27 à 0,95 tonne ha⁻¹, [tableau 4](#)).

Français Des différences de rendement au cours de la première année ont également été observées pour la pomme de terre et le maïs dans une étude menée dans le sud du Danemark [[22](#)], bien que la taille moyenne des particules de la farine de roche glaciaire utilisée dans cette étude soit considérablement plus petite que le matériau basaltique appliqué dans cette étude (2,6 µm contre 1147 µm). Une augmentation moyenne similaire de 21 % du rendement *du Sorghum bicolor* a été constatée dans une expérience contrôlée à l'échelle du mésocosme avec un taux d'application de 100 tonnes ha⁻¹ (une multiplication par cinq du taux d'application de basalte par rapport à cette étude), une irrigation suffisante et des températures contrôlées [[15](#)]. Une augmentation encore plus importante de 100 % du rendement du soja a été signalée dans une expérience canadienne en microparcelles [[50](#)], l'ampleur de cette augmentation pouvant s'expliquer par l'utilisation de wollastonite, un minéral à dissolution plus rapide, encore une fois administré à un taux d'application relativement élevé de 100 tonnes ha⁻¹.

Les résultats de cette étude sont remarquables car les conditions limites expérimentales étaient censées conduire à des taux de dissolution inférieurs par rapport aux études discutées ci-dessus, et donc à des réponses de rendement des cultures plus faibles. L'étude actuelle était limitée par une taille de particules de basalte allant jusqu'à 4 mm, un taux d'application réduit, une saison de croissance relativement sèche ([S1 Fig](#)) et une incorporation minimale de basalte dans le sol. Par conséquent, l'ampleur de la différence de rendement observée ici en raison de l'amendement de basalte était initialement inattendue au cours de la première saison de croissance. Cependant, étant donné les conditions de saison de croissance sèche, les cultures cultivées dans des parcelles amendées de basalte ont pu être renforcées par une meilleure résistance à la sécheresse conférée par l'absorption de silicium supplémentaire libéré par des minéraux silicatés à dissolution rapide [[51](#) – [53](#)]. Il faudra étudier dans de futurs essais si des rendements significativement plus élevés de cette ampleur en raison de l'amendement de basalte

auraient pu se produire au cours d'une saison de croissance qui n'était pas relativement sèche. Cependant, cela peut indiquer que les amendements du sol utilisant du basalte concassé ont le potentiel d'améliorer la résistance des cultures à des conditions plus sèches.

Français Statistiquement, l'effet le plus fort sur le rendement des cultures était celui du type de culture ($p < 0,005$, [tableau 5](#)), avec une différence de rendement moyen entre les amendements basaltiques d'environ 2 tonnes ha^{-1} ([figure 2](#)). Cependant, la variance au sein des groupes de semis direct, tant pour les traitements témoins que pour les traitements amendés au basalte, était beaucoup plus élevée que dans les groupes labourés ([tableau 4](#)). Il est possible qu'une mauvaise implantation dans les parcelles de semis direct ait donné lieu à ce résultat, avec un peuplement irrégulier et inégal observé tout au long de la saison de croissance. La culture en semis direct a été introduite en 2019 et les dates de semis et les taux de semis ont été maintenus constants avec les parcelles labourées par la suite. On peut s'attendre à ce que ces facteurs entraînent des performances plus faibles, en particulier sur les sols argileux lourds dans les climats tempérés où la baisse de rendement après le passage aux méthodes de semis direct est courante (en particulier dans les premières années après le passage au labour [[54](#)]), et souvent compensée commercialement par des dates de semis variables et des taux de semis croissants. Cela peut également expliquer pourquoi les résultats obtenus ici contredisent ceux d'autres études, dans lesquelles des augmentations substantielles du rendement des cultures et de la biomasse aérienne ont été obtenues à partir de champs semés directement [[55](#)]. Les conditions d'humidité du sol au moment du semis peuvent également avoir été défavorables dans les parcelles semées directement, ce qui a conduit à la forte variabilité observée.

Aucun effet d'interaction n'a été constaté entre les types de culture et l'amendement basaltique sur le rendement, ce qui est similaire à tous les autres paramètres modélisés. L'absence d'effet d'interaction pourrait être attribuée à l'incorporation limitée de basalte pendant le semis, compte tenu de la profondeur cible de 2 cm pour les parcelles labourées et en semis direct ; c'est-à-dire que le basalte a été appliqué après le travail du sol et n'a pas été incorporé mécaniquement au sol sur les parcelles labourées. Par conséquent, dans cette étude, les deux types de culture ne représentent pas des stratégies d'incorporation de basalte différentes, mais plutôt des différences dans la structure du sol sous-jacent, pour lesquelles l'effet de l'amendement basaltique semble agnostique.

pH du sol

Français L'amendement basaltique a conduit à un pH du sol significativement plus élevé par rapport à la parcelle témoin, à la fois dans les parcelles en semis direct (en moyenne 6,47 contre 6,76) et dans les parcelles labourées (en moyenne 6,69 contre 6,89) ([tableau 4](#)). Par conséquent, un pH modéré, mais significativement plus élevé (en moyenne 0,29 et 0,2 unité de pH) a été observé 256 jours après l'application de basalte. Bien que les échantillons de sol n'aient pas été prélevés pendant la saison de croissance, on peut supposer que la différence significative de rendement observée avec l'application de basalte était probablement due à des différences modestes de pH du sol qui se sont manifestées pendant le cycle de culture. À l'appui de cette hypothèse, des indications de différences de pH entre les parcelles pendant la saison de croissance ont été observées dans l'absorption significativement réduite de manganèse et de fer dans les parcelles amendées en basalte (tableaux [4](#) et [5](#)). La disponibilité de ces nutriments par les plantes diminue brusquement au-dessus d'un pH de 6,5 [[4](#), [56](#), [57](#)]. Bien que des précautions doivent être prises lors de l'évaluation des niveaux de pH absolus, le pH du sol dans cette étude variait autour de 6,5 (6–7,5, [Fig 3](#)).

Français La différence moyenne du pH du sol observée ici est du même ordre de grandeur que celle observée dans une étude utilisant une roche contenant un minéral à dissolution plus rapide, la wollastonite (un minéral qui se dissout jusqu'à 1200 fois plus vite que les minéraux silicatés qui s'altèrent plus rapidement [45]), appliquée à raison de 30 tonnes ha⁻¹. La différence moyenne rapportée dans [50] était de 0,3 unité de pH par rapport au sol témoin, ce qui a été obtenu après seulement 98 jours. De plus, les cultures utilisées dans cette étude étaient le soja fixateur d'azote et la luzerne [50], qui ont un effet acidifiant plus fort sur le sol, par rapport à l'avoine de printemps. Par conséquent, l'effet sur le pH du sol aurait pu être plus faible dans la présente étude si une culture fixatrice d'azote similaire avait été utilisée. Le pH de départ du sol dans [50] était similaire au pH quasi-neutre du sol dans cette étude. Français Dans les sols plus acides, des changements encore plus importants du pH du sol ont été observés, par exemple [58] ont signalé un changement de 0,5 unité de pH (de 4,7 à 5,2) dans les 9 mois suivant l'application de 20 tonnes ha⁻¹ de basalte. Cependant, les taux de dissolution devraient être plus favorables dans l'étude de [58], où la taille des particules utilisée était inférieure à 250 µm, et l'étude a été menée dans une plantation de cacao malaisienne avec des températures et des taux de précipitations tropicaux.

Français Comparé aux études ci-dessus, les conditions limites dans cette étude sont moins favorables, et donc la différence de pH du sol entre les parcelles témoins et les parcelles amendées au basalte devrait être plus faible au cours de la première année d'application. Les différences significatives de pH la première année peuvent être attribuées à la teneur en calcite à dissolution plus rapide de 3,6 % en poids ([tableau 1](#)). La contribution de la fraction de calcite (carbonate de calcium) dans cette étude était de 0,68 tonne ha⁻¹. Comparativement, si un produit à base de calcaire avec un équivalent efficace de carbonate de calcium de 70 % (similaire à un produit à base de calcaire utilisé dans [59]) et une densité d'application de 2 à 5 tonnes ha⁻¹ (taux d'application unique typique dans le nord-est de l'Angleterre, selon la texture du sol et le pH de départ) avait été utilisé, la contribution serait comprise entre 1,4 et 3,5 tonnes ha⁻¹ de carbonate de calcium (concentrations entre deux et cinq fois plus élevées que celle du basalte). Une étude de six basaltes de différentes provinces géologiques a permis d'identifier des concentrations de carbonate allant jusqu'à 1,25 % en poids [60], ce qui est relativement élevé par rapport à la teneur en calcite de la matière première de Divet Hill. Cependant, comme illustré ci-dessus, malgré la teneur relativement élevée en calcite du basalte de Divet Hill, une seule application avec un taux d'application cible de 20 tonnes ha⁻¹ ne suffirait pas à remplacer une seule application de chaux classique.

Français Les minéraux silicatés à dissolution plus rapide, l'andésine, l'augite, l'amphibole et peut-être la phase amorphe, sont également susceptibles d'avoir contribué à la différence de pH du sol, bien que les taux de dissolution neutres (qui seraient dominants dans les conditions de pH du sol dans cette étude) soient au moins 30 000 fois plus lents que le taux de dissolution de la calcite ([tableau 1](#)). La dissolution des minéraux carbonatés exposés peut rapidement élever le pH du sol à court terme, tandis que l'altération des minéraux silicatés aura un effet neutralisant à plus long terme sur le pH du sol, en raison de taux de dissolution comparativement plus lents ([tableau 1](#)). Par conséquent, les basaltes contenant de la calcite peuvent être intéressants pour les producteurs qui cherchent à modifier rapidement le pH de leur sol. L'ensemble de données disponible ne permet pas de quantifier la contribution relative de la dissolution des minéraux calcite et silicate à l'effet observé du pH.

Un pH significativement plus faible dans les parcelles de semis direct par rapport aux parcelles labourées a également été observé ([tableau 5](#)). Cette différence peut être due à une conservation accrue de la matière organique du sol dans les parcelles de semis direct depuis la

mise en œuvre de ce type de culture en 2019 [61], bien que cela n'ait pas été étudié dans la présente étude.

L'absorption des nutriments

Français Les différences de première année dans l'absorption des nutriments comprennent une concentration significativement plus élevée de potassium dans les tissus des grains et des plantes et une concentration plus élevée de calcium dans les tissus des plantes, dans les échantillons prélevés dans les parcelles amendées au basalte. La concentration significativement plus élevée de potassium dans les grains corrobore les résultats obtenus par [15], tandis que la concentration tissulaire plus élevée de potassium n'a pas été observée par [15]. La concentration significativement plus élevée de potassium, à la fois dans les tissus et les grains, dans tous les types de culture n'est probablement pas la seule indication des changements du pH du sol, car on ne pense pas que la disponibilité du potassium augmente sensiblement avec les changements de pH dans les plages observées dans cette étude [57 , 62]. Cela concorde également avec [63] qui a observé une diminution plus faible du potassium du sol dans les parcelles amendées au basalte, par rapport aux parcelles amendées à la chaux, où le pH du sol était élevé. On émet donc l'hypothèse que le potassium élevé observé dans les tissus et les grains peut provenir d'autres processus en plus des différences de pH du sol.

Français Le potassium supplémentaire peut provenir de diverses sources, notamment : (1) la roche, (2) le sol et (3) via des relations symbiotiques plante-microbe. Considérant la roche, le potassium peut provenir de la phase illite/mica identifiée par DRX, car le potassium est un composant clé de l'illite et de plusieurs minéraux de mica (par exemple la muscovite et la biotite). Cette phase est généralement considérée comme ayant une vitesse de dissolution moyennement rapide, mais elle se dissoudra toujours et pourra libérer du potassium supplémentaire dans l'eau interstitielle du sol. De plus, comme le calcium et le magnésium, le potassium dans la phase illite/mica peut être libéré préférentiellement dans la solution du sol avant que les liaisons silicium-oxygène ne soient rompues, comme supposé [64] et observé [65] dans des études précédentes. Considérant le sol, le calcium et le magnésium libérés par les minéraux à altération plus rapide peuvent déplacer le potassium natif des sites d'échange de cations du sol, le rendant plus accessible aux plantes. Une adsorption compétitive de ce type a été observée dans [27], où la matière première EW utilisée était l'olivine, qui ne contenait pas de potassium. De plus, le potassium peut également avoir été extrait préférentiellement de la structure minérale par des micro-organismes, notamment des champignons mycorhiziens [66], bien que cette hypothèse n'ait pas été étudiée dans cette étude.

Français Une absorption de calcium significativement plus élevée dans les tissus végétaux des parcelles amendées au basalte a été observée pour tous les types de culture, alors qu'aucune différence de ce type n'a été observée pour le magnésium. Le calcium et le magnésium sont tous deux facilement altérés par le basalte et on pense qu'ils sont préférentiellement lessivés des minéraux avant la rupture des liaisons silicium-oxygène au sein des minéraux [64]. Le basalte de Divet Hill contient du calcium (CaO : 8,97 % en poids) et du magnésium (MgO : 5,32 % en poids) ([Tableau 2](#)), et les deux cations sont présents dans les phases silicatées à dissolution plus rapide (par exemple, l'augite et l'amphibole - [Tableau 1](#)). Cependant, le calcium est également présent dans la calcite ([Tableau 1](#) — qui se dissout au moins 30 000 fois plus vite que l'augite et l'amphibole), et est supposé ici être la principale source de calcium pendant la première saison de croissance. Français Dans une étude à l'échelle du mésocosme tropical, en utilisant un basalte avec une composition chimique similaire à celle de Divet Hill (CaO : 8,92 % en poids et MgO : 5,36 % en poids) et un sol limono-argileux sablonneux, une augmentation significative de la teneur en calcium et en magnésium des pousses de plantes a été observée

dans le maïs et le soja [59], ce qui suggère que le magnésium peut également être fourni par l'application de basalte. Dans une étude ultérieure similaire du même groupe de recherche [67], aucune augmentation du magnésium du sol n'a été détectée, seulement du calcium du sol, à la suite de l'amendement de basalte. Bien que des différences significatives dans l'absorption de magnésium n'aient pas été mises en évidence pendant la première saison de croissance dans l'étude actuelle, elles peuvent se manifester pendant les saisons de croissance suivantes, car l'absence d'absorption élevée de magnésium par les plantes n'est pas nécessairement due à l'absence de dissolution du basalte. [15] n'ont trouvé aucune augmentation de magnésium dans les racines et les pousses des plantes, mais ont montré une diminution significative du magnésium dans les grains de basalte extraits de l'expérience (par rapport aux grains de basalte non altérés). De plus, dans [15], il y a eu une augmentation significative du magnésium sur les surfaces d'échange de cations du sol (comme interprété à partir des extractions d'acétate d'ammonium), ce qui suggère que certains produits d'altération du basalte peuvent être moins disponibles pour les plantes que d'autres.

Les concentrations de bore, tant dans les grains que dans les tissus végétaux, étaient également significativement plus élevées en réponse à l'amendement basaltique des sols dans l'étude actuelle. Les raisons de ce phénomène restent obscures et méritent d'être étudiées plus en détail.

Le phosphore, un élément nutritif essentiel pour les plantes, est présent dans le basalte de Divet Hill à des concentrations de 0,1280 % en poids ([tableau 3](#)), bien que nous n'ayons pas détecté d'apatite de phosphate de calcium dans la roche. À cette concentration de phosphore, l'apatite serait présente à une concentration de 0,7 % en poids, ce qui n'est pas susceptible d'être résolu par DRX. De plus, nous n'avons pas identifié de différence significative dans la concentration de phosphore dans le grain ou le tissu végétal à la suite de l'amendement du basalte ([tableau 5](#)).

Lorsque des différences significatives ont été observées dans l'analyse des grains et des tissus entre les deux types de culture ([tableau 5](#)), les concentrations en éléments nutritifs dans les parcelles de semis direct étaient toujours plus élevées, à la seule exception du potassium tissulaire ([tableau 4](#)). Bien que les systèmes de semis direct puissent offrir des avantages pour la rétention des éléments nutritifs du sol, cette absorption élevée pourrait être liée à la faible densité de culture observée dans ces parcelles, ce qui entraîne une concurrence réduite pour les éléments nutritifs avec les plantes voisines.

Éléments potentiellement toxiques

Français Rien n'indique que l'application de roche basaltique concassée ait entraîné une accumulation de PTE dans les céréales, ce qui suggère que les cultures amendées avec ce produit sont sans danger pour la consommation humaine et animale (tableaux 4 et 5). La toxicité du produit n'était pas attendue dans l'étude actuelle, en particulier étant donné que les concentrations d'éléments dans le basalte de Divet Hill ne dépassent aucun des seuils de l'UE pour les produits d'amendement des sols inorganiques ([tableau 3](#)). Des limites alimentaires pour les PTE dans les céréales ont été identifiées pour le cadmium ($0,1 \text{ mg kg}^{-1}$) et le plomb ($0,2 \text{ mg kg}^{-1}$), le mercure dans les produits de la pêche ($0,5 \text{ mg kg}^{-1}$, [68]) et pour l'arsenic dans le blé (1 mg kg^{-1} , [69]). Les concentrations dans les grains étudiées étaient bien inférieures à ces limites, le plomb et le mercure étant indétectables et les concentrations maximales de cadmium et d'arsenic étant respectivement de $0,07 \text{ mg kg}^{-1}$ et $0,26 \text{ mg kg}^{-1}$. Bien qu'il n'existe pas de limites alimentaires publiées pour le chrome et le nickel, il est rassurant de constater qu'aucune augmentation significative des concentrations dans les grains n'a été observée pour ces éléments ([tableau 5](#)).

Conclusion

L'application de roche basaltique concassée a entraîné des rendements d'avoine de printemps significativement plus élevés dans les parcelles semées directement et labourées, au cours de la première saison de croissance. La différence de rendement entre les parcelles témoins et les parcelles amendées au basalte est principalement attribuée à une différence modeste de pH du sol, qui, pendant la saison de croissance, a entraîné une réduction de l'absorption de manganèse par les grains et les tissus, ainsi qu'une réduction de l'absorption de fer par les tissus. Les différences de pH du sol signalées étaient probablement principalement dues à la dissolution rapide de la calcite et, dans une moindre mesure, à la dissolution de minéraux silicatés à dissolution plus rapide. La première est soutenue par une teneur en calcium tissulaire significativement plus élevée, tandis que la seconde est soutenue par une teneur en potassium tissulaire et grainière significativement plus élevée, dans les cultures des parcelles amendées au basalte. Cependant, il est important de noter que la saison de croissance exceptionnellement sèche de 2022 dans le nord-est de l'Angleterre peut avoir amplifié les différences de rendement des cultures, par le biais de facteurs secondaires qui n'ont pas été entièrement examinés par cette étude. Les différences significatives apparues dans cette étude en raison de l'amendement basaltique étaient apparemment indépendantes du type de culture (en fait de la structure du sol sous-jacent), probablement en raison du manque d'incorporation mécanique du basalte dans le sol labouré. Les différences de rendement et d'éléments nutritifs des plantes dues à la culture sont en grande partie attribuées à une mauvaise levée (et donc à une moindre concurrence pour les éléments nutritifs entre les plantes) de l'avoine de printemps cultivée dans les parcelles de semis direct. L'application de basalte n'a pas entraîné d'accumulation de PTE dans les grains par rapport aux parcelles témoins, ce qui indique que les cultures amendées avec cette roche basaltique concassée particulière sont propres à la consommation.

Références

1. **1.**Manning DAC, Theodoro SH. Favoriser la sécurité alimentaire grâce à l'utilisation de roches et de minéraux locaux. *Extr Ind Soc.* 2020;7:480–487.
2. **2.**Hossain A, Krupnik TJ, Timsina J, Mahboob MG, Chaki AK, Farooq M, et al. 2. Dans : *Dégradation des terres agricoles : processus et problèmes compromettant la sécurité alimentaire future.* Cham, Suisse : Springer Nature Switzerland AG ; 2020. p. 17–61.
3. **3.**Lal R. La sécurité alimentaire dans un climat changeant. *Ecohydrol & Hydrobiol.* 2013;13:8–21.
4. **4.**Kantola IB, Masters MD, Beerling DJ, Long SP, DeLucia EH. Potentiel des terres cultivées et des cultures bioénergétiques mondiales pour l'atténuation du changement climatique grâce à un déploiement pour une meilleure résistance aux intempéries. *Bio Lett.* 2017 ; 13 : 20160714. pmid : 28381630
5. **5.**Beerling DJ, Kantzas EP, Lomas MR, Wade P, Eufrazio RM, Renforth P, et al. Potentiel d'élimination du CO₂ à grande échelle par altération améliorée des roches dans les terres cultivées. *Nature.* 2020;583:242–248. pmid:32641817
6. **6.**Hartmann J, West AJ, Renforth P, Köhler P, Rocha CLDL, Wolf-Gladrow DA, et al. L'altération chimique renforcée comme stratégie de géo-ingénierie pour réduire le dioxyde de

carbone atmosphérique, fournir des nutriments et atténuer l'acidification des océans. Rev Geophys. 2013;51:113–149.

7. **7.**Jones DL, Cross P, Withers PJA, DeLuca TH, Robinson DA, Quilliam RS, et al. REVUE : Décapage des nutriments : la disparité mondiale entre la sécurité alimentaire et les stocks de nutriments du sol. J Appl Ecol. 2013 ; 50 : 851–862.
8. **8.**Ramos CG, Hower JC, Blanco E, Oliveira MLS, Theodoro SH. Possibilités d'utilisation de la poudre de roche silicatée : un aperçu. Geosci Front. 2022;13:101185.
9. **9.**Swoboda P, Döring TF, Hamer M. Reminéralisation des sols ? L'utilisation agricole des poudres de roches silicatées : une revue. Sci Total Environ. 2022 ;807 :150976. pmid :34662609
10. **10.**Villiers ODD. Régénération des sols par basalte concassé à l'île Maurice Partie I — Résultats cohérents d'intérêt mondial. Int Sugar J. 1961;63:363–364.
11. **11.**Villiers ODD. Rajeunissement des sols avec du basalte concassé à l'île Maurice Partie I - La fertilité du basalte et ses effets nutritionnels. Int Sugar J. 1961;63:3–5.
12. **12.**Albert R. Sur l'utilisation des débris fins des carrières de pierre pour l'amélioration des sols forestiers pauvres. Forstarchiv. 1938;14:229–240.
13. **13.**Hilf HH. La fumure des sols pauvres avec du gravier basaltique. Forstarchiv. 1938;14:93–100.
14. **14.**Ramezani A, Dahlin AS, Campbell CD, Hillier S, Mannerstedt-Fogelfors B, Öborn I. L'ajout de poussière de roche volcanique aux sols n'a aucun effet observable sur le rendement des plantes et l'état nutritionnel ou sur l'activité microbienne du sol. Plantes et sols. 2013;367:419–436.
15. **15.**Kelland ME, Wade PW, Lewis AL, Taylor LL, Sarkar B, Andrews MG, et al. Augmentation du rendement et du potentiel de séquestration du CO₂ avec la céréale C₄ *Sorghum bicolor* cultivée dans un sol agricole amendé avec de la poussière de roche basaltique. Glob Chang Biol. 2020 ; 26 : 3658–3676. pmid : 32314496
16. **16.**Wilson M. Pétrogénèse ignée. Springer; 1989.
17. **17.**Le Bas MJ, Maitre RL, Streckeisen A, Zanettin B, sur la systématique des roches ignées IS. Une classification chimique des roches volcaniques basée sur le diagramme alcali-silice total. Journal of petrology. 1986;27(3):745–750.
18. **18.**Lewis AL, Sarkar B, Wade P, Kemp SJ, Hodson ME, Taylor LL, et al. Effets de la minéralogie, de la chimie et des propriétés physiques des basaltes sur le potentiel de capture du carbone et la libération d'éléments nutritifs des plantes via une altération améliorée. Appl Geochem. 2021;132:105023.
19. **19.**Hänsch R, Mendel RR. Fonctions physiologiques des micronutriments minéraux (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). Curr Opin Plant Biol. 2009 ;12 : 259–266. pmid : 19524482

20. **20.**Islam M, Mohsan S, Ali S. Effet interactif du soufre et du phosphore sur la nodulation, la fixation de l'azote et l'absorption des nutriments par les pois chiches cultivés sur des sols calcaires au Pakistan. *J Plant Nutr.* 2013;36:1649–1658.
21. **21.**Kumar S, Kumar S, Mohapatra T. Interaction entre les macro- et micro-nutriments dans les plantes. *Front Plant Sci.* 2021;12. pmid:34040623
22. **22.**Gunnarsen KC, Jensen LS, Rosing MT, Dietzen C. La farine de roche glaciaire du Groenland améliore le rendement des cultures en agriculture biologique. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2023;126:51–66.
23. **23.**Silva B, Paradelo R, Vázquez N, García-Rodeja E, Barral MT. Effet de l'ajout de poudre granitique à un sol acide de Galice (nord-ouest de l'Espagne) en comparaison avec la chaux. *Environ Earth Sci.* 2013;68:429–437.
24. **24.**de Lima Dias KG, Guimarães PTG, do Carmo DL, Reis THP, de Jesus Lacerda JJ. Sources alternatives de potassium dans les plants de café pour une meilleure fertilité du sol, une meilleure productivité et une meilleure qualité des boissons. *Pesqui Agropecu Bras.* 2018 ;53 : 1355-1362.
25. **25.**Dupla X, Möller B, Baveye PC, Grand S. Accumulation potentielle d'oligo-éléments toxiques dans les sols lors de l'altération renforcée des roches. *Eur J Soil Sci.* 2023;74.
26. **26.**Vink JPM, Knops P. Altération fractionnée par taille de l'olivine, son taux de séquestration du CO₂ et évaluation du risque écotoxicologique de la libération de nickel. *Minéraux.* 2023;13:235.
27. **27.**ten Berge HFM, van der Meer HG, Steenhuizen JW, Goedhart PW, Knops P, Verhagen J. Altération de l'olivine dans le sol et ses effets sur la croissance et l'absorption des nutriments dans le ray-grass (*Lolium perenne* L.) : une expérience en pot. *PLoS Un.* 2012;7:e42098. midi:22912685
28. **28.**Amann T, Hartmann J, Struyf E, de Oliveira Garcia W, Fischer EK, Janssens I, et al. Altération améliorée et flux d'éléments associés : une approche de mésocosme des terres cultivées. *Biogeosciences.* 2020;17:103–119.
29. **29.**Berling DJ, Leake JR, Long SP, Scholes JD, Ton J, Nelson PN, et al. Agriculture avec des cultures et des roches pour répondre à la sécurité climatique, alimentaire et des sols à l'échelle mondiale. *Nat Plants.* 2018 ;4 : 138–147. pmid : 29459727
30. **30.**UE. Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) n° 1069/2009 et (CE) n° 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) n° 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) ; 2019. Disponible à l'adresse suivante : <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> .
31. **31.**Xiao X, Zhang J, Wang H, Han X, Ma J, Ma Y, et al. Distribution et évaluation des risques pour la santé des éléments potentiellement toxiques dans les sols autour des zones industrielles du charbon : une méta-analyse mondiale. *Sci Total Environ.* 2020 ;713 :135292. pmid :32019003

32. **32.**Tahat MM, Alananbeh K, Othman Y, Leskovar DI. Santé des sols et agriculture durable. Durabilité. 2020;12(12):4859.
33. **33.**Edwards CA, Lofty JR. L'effet du semis direct et de la culture minimale sur les populations de vers de terre. J Appl Ecol. 1982;19:723.
34. **34.**Gerard BM, Hay RKM. Effets du labour, de la culture en socs, du semis direct et de l'azote sur les vers de terre dans un système de monoculture d'orge. J Agric Sci. 1979;93:147–155.
35. **35.**Chaney K, Hodgson DR, Braim MA. Effets du semis direct, du travail superficiel du sol et du labour sur certaines propriétés physiques du sol dans une expérience à long terme sur l'orge de printemps. J Agric Sci. 1985;104:125–133.
36. **36.**Schjønning P, Rasmussen KJ. Résistance du sol et caractéristiques des pores du sol pour les sols semés et labourés directement. Soil and Tillage Res. 2000;57:69–82.
37. **37.**Koch HJ, Dieckmann J, Büchse A, Märländer B. Diminution du rendement de la betterave sucrière due à un travail réduit du sol et au semis direct. Eur J Agron. 2009;30:101–109.
38. **38.**Suchet PA, Probst JL, Ludwig W. Distribution mondiale de la lithologie des roches continentales : implications pour l'absorption du CO₂ atmosphérique par le sol par l'altération continentale et le transport fluvial alcalin vers les océans. Global Biogeochem Cycles. 2003;17.
39. **39.**Renforth P, Washbourne CL, Taylder J, Manning DAC. Production et disponibilité de silicate pour la carbonatation minérale. Environ Sci Technol. 2011 ; 45 : 2035–2041. pmid : 21332128
40. **40.**Zani CF, Manning DAC, Abbott GD, Taylor JA, Cooper J, Lopez-Capel E. Rotations de cultures diversifiées et amendements organiques comme stratégies pour augmenter le stockage et la stabilisation du carbone dans les sols des systèmes arables britanniques. Front Environ Sci. 2023;11.
41. **41.**Bilsborrow P, Cooper J, Tétard-Jones C, Średnicka Tober D, Barański M, Eyre M, et al. Effet de la gestion biologique et conventionnelle sur le rendement et la qualité du blé cultivé dans un essai au champ à long terme. Eur J Agron. 2013;51:71–80.
42. **42.**Royaume-Uni K. WPB Elyann—Orge et avoine—Céréales—Produits- KWS UK Ltd ; 2021.
43. **43.**Cooper J, Sanderson R, Cakmak I, Ozturk L, Shotton P, Carmichael A, et al. Effets des pratiques de rotation, de fertilisation et de protection des cultures biologiques et conventionnelles sur la teneur en métaux du blé (*Triticum aestivum*). J Agric Food Chem. 2011 ; 59 : 4715–4724. pmid : 21495704
44. **44.**Randall BAO. Dolérite-pegmatites du filon-couche de Whin près de Barrasford, Northumberland. Proc Yorkshire Geol Soc. 1989;47:249–265.
45. **45.**Palandri J, Kharaka Y. Une compilation des paramètres de taux de cinétique d'interaction eau-minéral pour application à la modélisation géochimique ; 2004.

46. **46.**Schielzeth H, Dingemanse NJ, Nakagawa S, Westneat DF, Allogue H, Teplitsky C, et al. Robustesse des modèles linéaires à effets mixtes aux violations des hypothèses de distribution. *Méthodes en écologie et évolution*. 2020;11(9):1141–1152.
47. **47.**Shapiro SS, Wilk MB. Un test d'analyse de variance pour la normalité (échantillons complets). *Biometrika*. 1965;52(3/4):591–611.
48. **48.**Murphy MR. Analyse et présentation des données de pH. *J Dairy Sci*. 1982;65:161–163.
49. **49.**Seabold S, Perktold J. Statsmodels : modélisation économétrique et statistique avec Python. Dans : Actes de la 9e conférence Python in Science. vol. 57. Austin, TX ; 2010. p. 10–25080.
50. **50.**Haque F, Santos RM, Chiang YW. Optimisation de la séquestration du carbone inorganique et du rendement des cultures grâce à l'amendement du sol à base de wollastonite dans une étude en microparcelles. *Front Plant Sci*. 2020 ; 11. pmid : 32719708
51. **51.**Manning DAC. Stabilités minérales dans les sols : comment les minéraux peuvent nourrir la planète et atténuer le changement climatique. *Clay Miner*. 2022 ; 57 : 31–40.
52. **52.**Edwards DP, Lim F, James RH, Pearce CR, Scholes J, Freckleton RP, et al. Atténuation du changement climatique : avantages et inconvénients potentiels de l'altération renforcée des roches dans l'agriculture tropicale. *Bio Lett*. 2017 ; 13 : 20160715. pmid : 28381631
53. **53.**Rea RS, Islam MR, Rahman MM, Nath B, Mix K. Croissance, accumulation de nutriments et tolérance à la sécheresse chez les plantes cultivées avec application de silicium : une revue. *Durabilité*. 2022;14:4525.
54. **54.**Agriculture, Board HD. No-till: opportunities and challenges for wheat and oilseed growers; 2018.
55. **55.**van Groenigen JW, Lubbers IM, Vos HMJ, Brown GG, D Deyn GB, van Groenigen KJ. Les vers de terre augmentent la production végétale : une méta-analyse. *Sci Rep*. 2014;4:6365. pmid:25219785
- 56.**Bromfield SM. L'effet des bactéries oxydant le manganèse et du pH sur la disponibilité des ions manganéux et des oxydes de manganèse pour l'avoine dans les solutions nutritives. *Plant Soil*. 1978;49:23–39.
56. **57.**Truog E. Influence de la réaction du sol sur la disponibilité des nutriments végétaux. *Soil Sci Soc Am J*. 1947;11:305–308.
57. **58.**Anda M, Shamshuddin J, Fauziah CI. Augmentation de la charge négative et de la teneur en éléments nutritifs d'un sol fortement altéré en utilisant du basalte et de la balle de riz pour favoriser la croissance du cacao dans des conditions de terrain. *Soil and Tillage Res*. 2013;132:1–11.
58. **59.**Luchese AV, Pivetta LA, Batista MA, Steiner F, da Silva Giaretta AP, Curtis JCD. Faisabilité agronomique de l'utilisation de la poudre de basalte comme reminéralisant des nutriments du sol. *Afr J Agric Res*. 2021;17:487–497.

59. **60.**Kemp SJ, Lewis AL, Rushton JC. Détection et quantification de faibles niveaux d'espèces minérales carbonatées à l'aide de la spectrométrie de masse thermogravimétrique pour valider la réduction du CO₂ par altération améliorée des roches. *Appl Geochem.* 2022;146:105465.
60. **61.**Heenan DP, Chan KY, Knight PG. Impact à long terme de la rotation, du travail du sol et de la gestion des chaumes sur la perte de carbone organique et d'azote du sol à partir d'un luvisol chromique. *Soil and Tillage Res.* 2004;76:59–68.
61. **62.**Hartemink AE, Barrow NJ. Relations pH du sol-éléments nutritifs : le diagramme. *Plant Soil.* 2023.
62. **63.**Luchese AV, de Castro Leite IJG, Alves ML, dos Santos Vieceli JP, Pivetta LA, Missio RF. La poudre de roche basaltique peut-elle être utilisée comme source alternative de nutriments pour le soja et le maïs ? *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 2023 ; p. 1–11.
63. **64.**Oelkers EH. Description cinétique générale de la dissolution des minéraux silicatés multioxydes et des verres. *Geochim Cosmochim Acta.* 2001;65:3703–3719.
64. **65.**Kalinowski BE, Schweda P. Cinétique de la dissolution et de l'altération de la muscovite, de la phlogopite et de la biotite à pH 1-4, température ambiante. *Geochim Cosmochim Acta.* 1996;60:367–385.
65. **66.**Bonneville S, Smits MM, Brown A, Harrington J, Leake JR, Brydson R, et al. Altération fongique induite par les plantes : premiers stades de l'altération minérale à l'échelle nanométrique. *Géologie.* 2009 ; 37 : 615–618.
66. **67.**Luchese AV, G de Castro Leite IJ, da Silva Giaretta AP, Alves ML, Pivetta LA, Missio RF. Utilisation de la poudre de roche basaltique issue des déchets de carrière comme reminéralisant du sol pour la culture du soja et du maïs. *Heliyon.* 2023;9(3). pmid:36925542
67. **68.**CE. Règlement (CE) n° 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE); 2006.
68. **69.**Shay J. Israel - Limites de métaux lourds dans les aliments. Tel Aviv : Département de l'agriculture des États-Unis, Service agricole étranger ; 2022. IS2022-0008.