

30 ans

16^e Rencontres

DE LA FERTILISATION RAISONNÉE ET DE L'ANALYSE

21, 22 et 23 novembre 2023

Palais des congrès de Tours

comifer

Gemas



16^e Rencontres

DE LA FERTILISATION RAISONNÉE ET DE L'ANALYSE

Altération facilitée de poudre de roche silicatée
sur des sols agricoles :
effets sur le pH du sol et sur les transferts minéraux sol-plante.

Charles Desmalles – Lionel Jordan-Meille – Stephan Haefele
Rothamsted Research
Bordeaux Sciences Agro
INRAE

Contexte

Altération des roches silicatées et roches en agriculture, quels points communs?



THE USE OF GROUND ROCKS IN LATERITE SYSTEMS: AN IMPROVEMENT TO THE USE OF CONVENTIONAL SOLUBLE FERTILIZERS?

O.H. LEONARDOS¹, W.S. FYFE² and B.I. KRONBERG³

¹Departamento de Geociências, Universidade de Brasília, 70910 Brasília D.F. (Brazil)
²Department of Geology, University of Western Ontario, London, Ont. N6A 5B7 (Canada)
³Department of Geology, Lakehead University, Thunder Bay, Ont. P7B 5E1 (Canada)

(Accepted for publication July 4, 1986)



LEI Nº 12.890 DE 10 DE DEZEMBRO DE 2013

PARA INCLUIR OS REMINERALIZADORES COMO UMA CATEGORIA DE INSUMO DESTINADO À AGRICULTURA, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS.



How will minerals feed the world in 2050?

David A.C. Manning*

School of Civil Engineering & Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK

RECUEIL
des
TRAVAUX SCIENTIFIQUES
de
M. ÉBELMEN.

TROISIÈME PARTIE.
RECHERCHES DE GÉOLOGIE.

I.
Recherches sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates.

Les produits de la décomposition des minéraux qui appartiennent à la famille des silicates ont été peu examinés jusqu'ici par les minéralogistes. Le seul fait acquis à la science est celui de la transformation des espèces feldspathiques en kaolin. Ce phénomène naturel s'est accompli et s'accomplit probablement encore tous les jours sur une grande échelle. Toutes les roches qui admettent une espèce feldspathique comme principe constituant, se présentent souvent dans un état plus ou moins avancé de décomposition, et l'on sait que ces roches forment à elles seules une partie considérable de l'écorce solide du globe. Mais l'élément feldspathique n'est pas le seul qui s'y trouve décom-

Neutralization of industrial waste acids with olivine – The dissolution of forsteritic olivine at 40–70 °C

J. VAN HERK*¹, H.S. PIETERSEN*² and R.D. SCHUILING

Department of Geochemistry, Institute of Earth Sciences, University of Utrecht, NL-3508 TA Utrecht

(Accepted for publication April 13, 1989)

Article

Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands

David J. Beerling^{1,2}, Euriplides P. Kantzas¹, Mark R. Lomas¹, Peter Wade¹, Rafael M. Eufrazio³, Phil Renforth⁴, Binoy Sarkar⁵, M. Grace Andrews⁶, Rachael H. James⁶, Christopher R. Pearce⁶, Jean-Francois Mercure⁷, Hector Politt⁸, Philip B. Holden⁹, Neil R. Edwards¹⁰, Madhu Khanna¹¹, Lenny Koh¹², Shaun Quegan¹³, Nick F. Pidgeon¹⁴, Ivan A. Janssens¹⁵, James Hansen¹⁶ & Steven A. Banwart^{16,17}

ENHANCED CHEMICAL WEATHERING AS A GEOENGINEERING STRATEGY TO REDUCE ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE, SUPPLY NUTRIENTS, AND MITIGATE OCEAN ACIDIFICATION

Jens Hartmann,¹ A. Joshua West,² Phil Renforth,³ Peter Köhler,⁴ Christina L. De La Rocha,⁵ Dieter A. Wolf-Gladrow,⁴ Hans H. Dürr,⁶ and Jürgen Scheffran⁷

Received 10 May 2012; revised 15 November 2012; accepted 24 January 2013; published 23 May 2013.



Carbon Drawdown Initiative

1845

Fin 20^{ème}

Années 1980

Années 1990

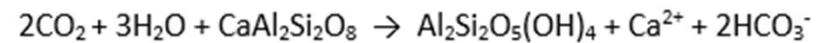
Années 2000

Depuis 2010

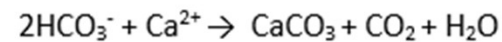
Altération naturelle des roches silicatées

- Première fois identifié en 1845 par Ebelmen
- Largement étudié à partir de la fin du 20^{ème} s.
- Objectif: compréhension et régulation du cycle géochimique du C

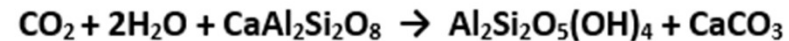
Altération



Précipitation des carbonates dans l'océan



Réaction globale

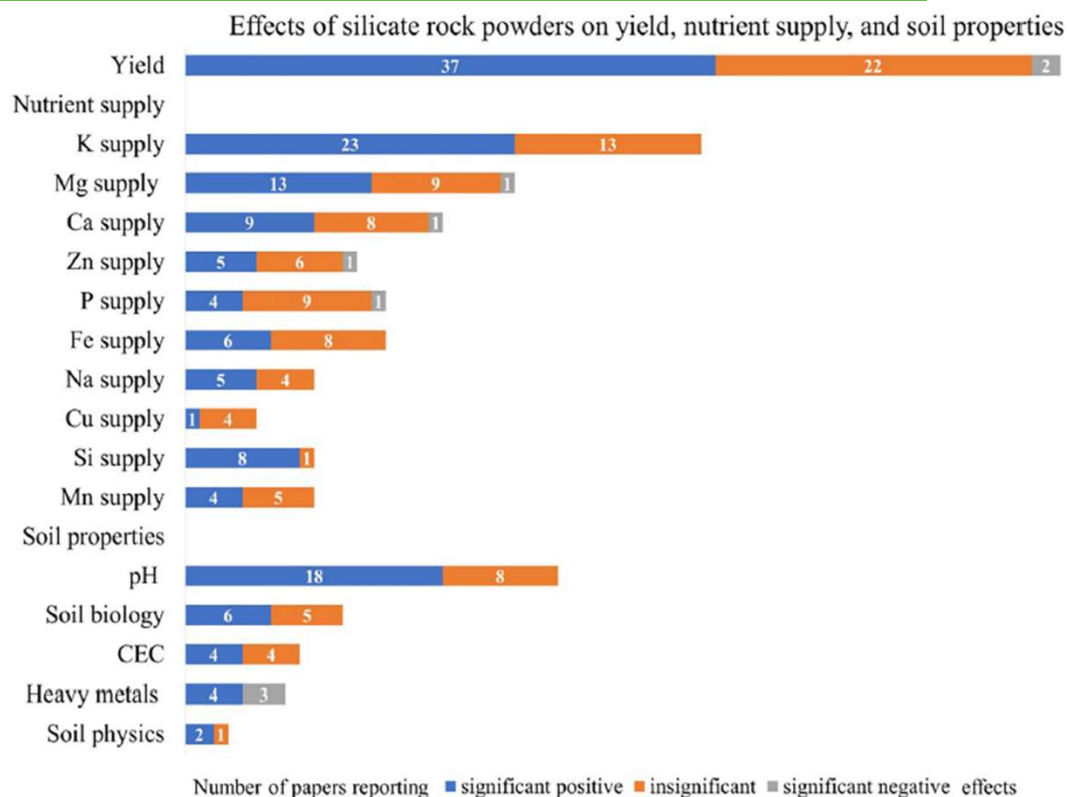


Berner 1992

Altération facilitée, que dit la recherche aujourd'hui?

- Un double potentiel: captage de carbone et bénéfices agricoles
- Des résultats encore contradictoires
- Des besoins: préciser les effets des contextes, intégrer différentes échelles spatiales

Une tendance importante:
**Projets interdisciplinaires
à grande échelle**



Origine du travail



Greenhouse gas removal with UK agriculture via enhanced rock weathering

Lead Research Organisation: [University of Sheffield](#)

Funded Value:

£4 635 236

Funded Period:

mai 21 - nov. 25

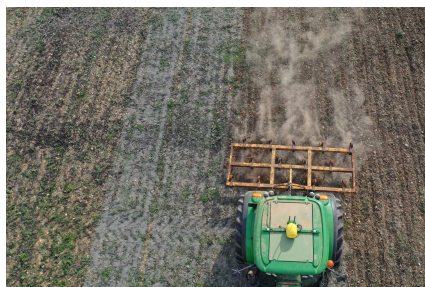
This ERW-GGR Demonstrator will provide the first integrated whole system assessment of the science, societal and scalability opportunities and challenges of ERW deployment in the UK agriculture. It will assess the potential of ERW to remove up to 10% of the UK's GGR net-zero target by testing its implementation on arable land and the types of grasslands covering 74% of UK utilized agricultural area (~13 million ha)



Objectifs et questions principales

30 ans

Evaluer les effets du basalte sur le statut nutritionnel d'un système sol-plante



- L'amendement de basalte a-t-il un effet significatif sur le **pH du sol** à l'échelle d'une saison culturale ?

- A-t-il des effets sur la **nutrition minérale** de la plante à cette même échelle?

- Le déploiement de cette technique est-il compatible, en **efficacité et en innocuité**, avec l'échelle de temps agricole?



Plan de présentation du travail

30 ans



- Conception de l'expérimentation
- Matériel utilisé et éléments de méthode
- Les résultats d'intérêt agricole
- Synthèse des résultats et perspectives

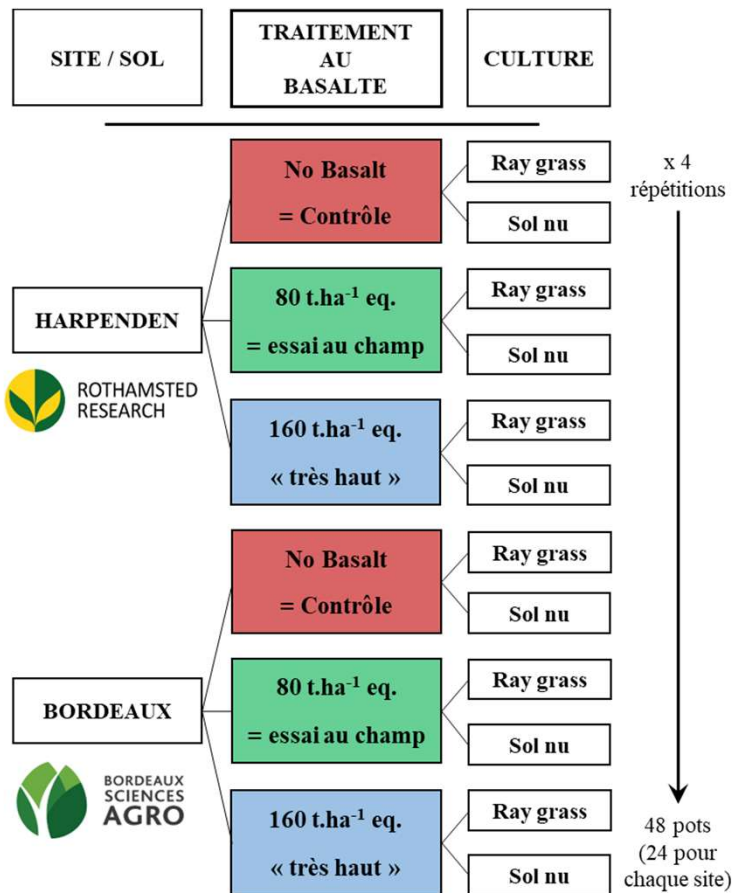


Conception de l'expérimentation

30 ans



- Inspirée des essais au champ



- Un essai en pot
- Dupliqué sur 2 sites



Matériel et méthode

30 ans



2 sols d'essais agricoles à long terme:

« Bordeaux »
horizon superficiel
d'un podzosol

(95% de sable)



« Harpenden »
horizon superficiel
d'un luvisol
limono-argileux
(~50 et 20%)



Une poudre de basalte:
déchet « grossier »
de l'industrie minière anglaise



	Unité	Sols		Basalte (poudre)
		Bordeaux	Harpenden	
pH		5.79	5.53	8.79
CaCO ₃	%	0.00	0.01	0.16
N _{tot.}	%	0.1127	0.12	0.002
C _{org.}	%	2.18	1.37	0.19
CEC _{eff.}	cmol+ kg _{sol} ⁻¹	5.7	9.2	5.9
E. biodisponibles	P	31 71	5.5 13	0.7 2
	Ca	550	1064	1832
	Mg	74	49	56
	K	52 63	109 131	47 57
	Na	8.5	7.8	49
	Al	2.59	4.47	< QL
	Mn	0.70	22.9	2.8
	Zn	0.53	1.39	< QL
	Ni	< QL	0.44	< DL
E. totaux	Al	1414	15290	29026
	Ca	821	1388	27021
	Fe	627	22889	47831
	K	153	2036	1672
	Mg	143	1446	11411
	Mn	11	1127	419
	Na	54	111	5070
	Ni	0.7	17	26
	P	168	452	952
	Ti	66	236	2029
Zn	6	54	68	

P₂O₅Olsen

K₂O ech

Présentation des résultats principaux

30 ans



- **Tendances générales:**

 - Réponse du pH des sols au traitement par le basalte

 - Réponse du rendement, indicateur de nutrition de la plante

- **Echanges minéraux dans le système sol-plante:**

 - Exemple de deux éléments majeurs

 - Exemple de deux éléments traces métalliques

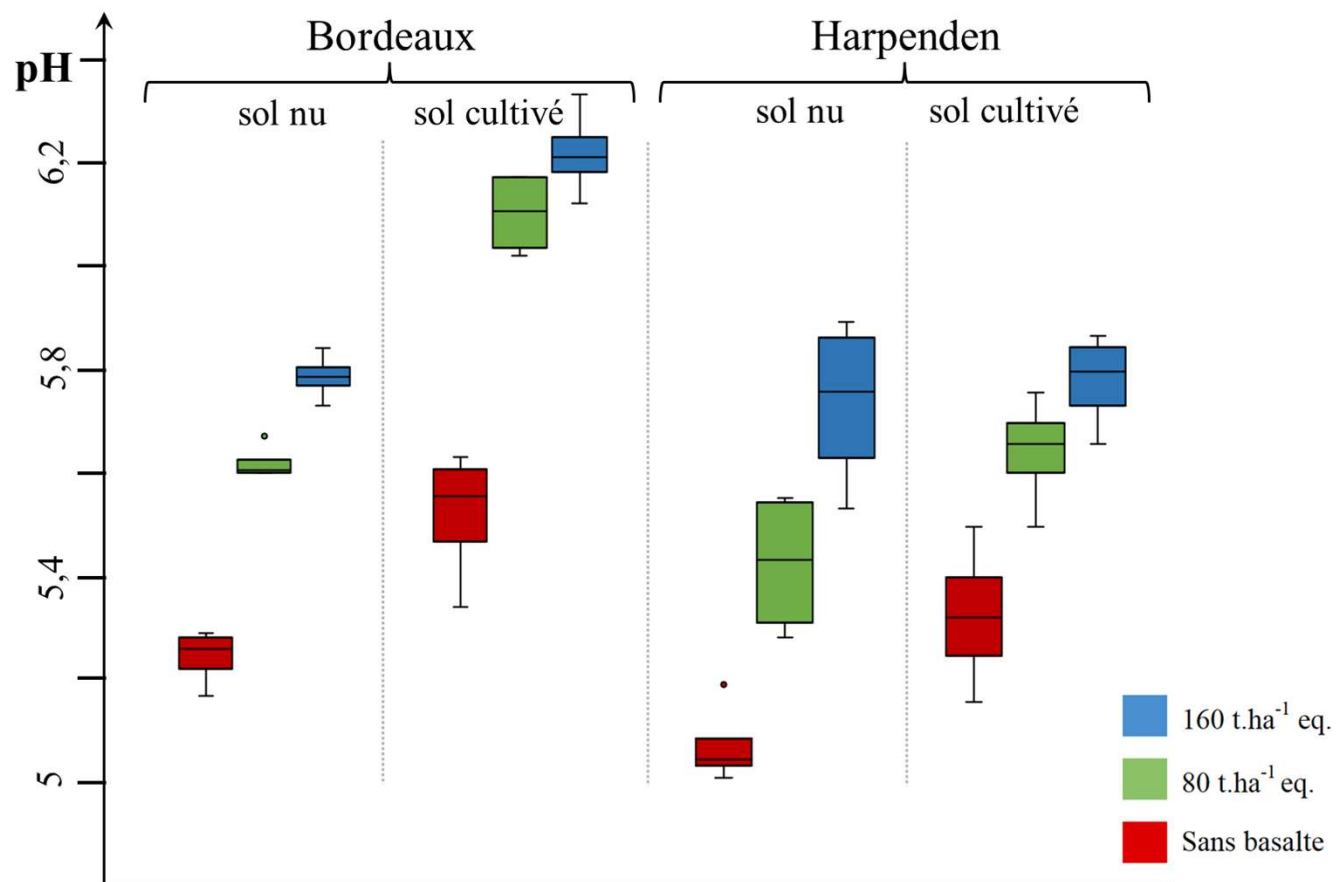
- **Tentative de synthèse des réponses au basalte pour la nutrition minérale**

Réponse du pH du sol à l'amendement de basalte



Un effet récurrent

- Jusqu'à +0,8 points de pH
- Un effet moyen de +0,6 points de pH
- Très peu influencé par le type de sol
- A relativiser: faible équivalent de valeur neutralisante

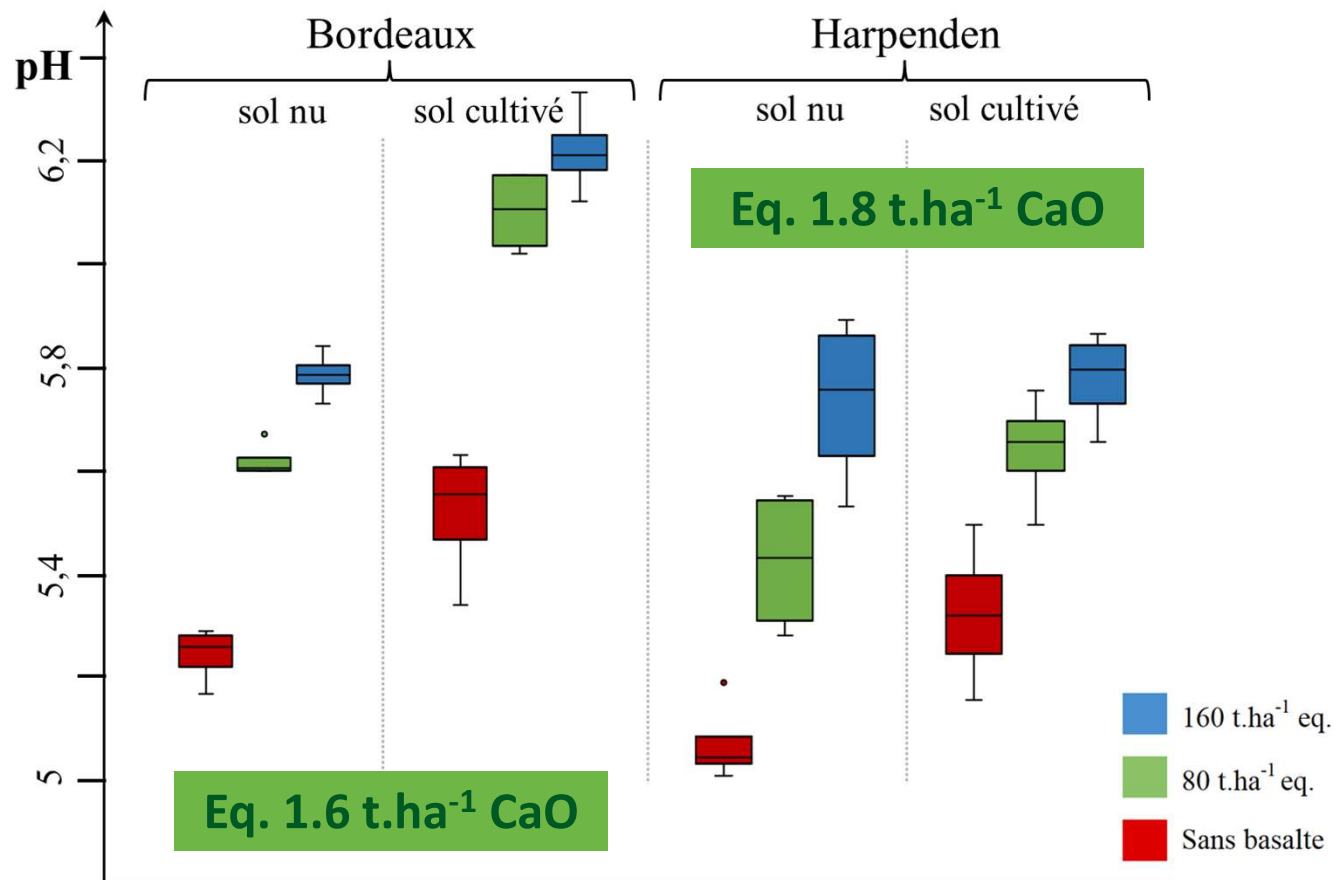


Réponse du pH du sol à l'amendement de basalte



Un effet alcalinisant

- Jusqu'à 0,8 points de pH
- Un effet moyen de 0,6 points de pH
- Très peu influencé par le type de sol
- **A relativiser: faible équivalent de valeur neutralisante**



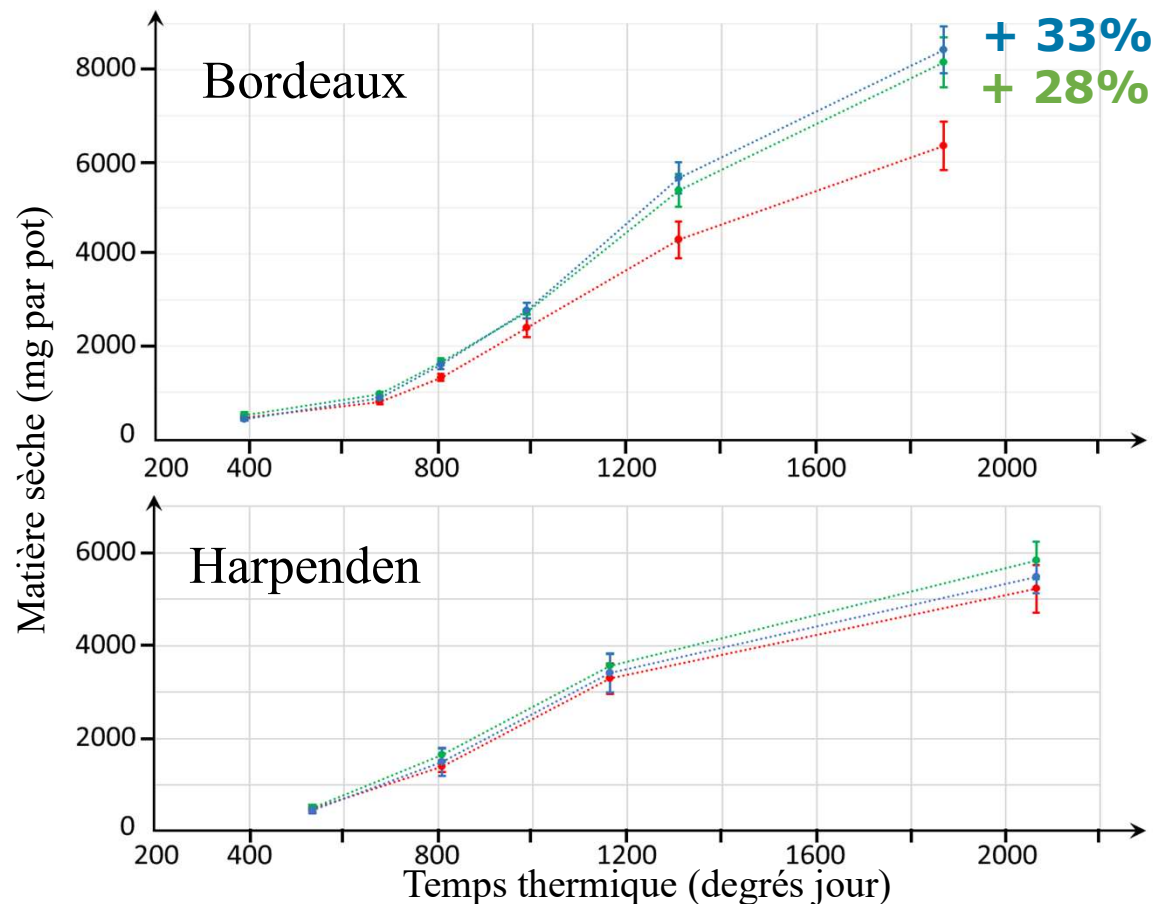
Réponse du rendement à l'amendement de basalte

30 ans



Dépend du contexte

- Notamment du type de sol et son état initial
- Un gain de rendement significatif à Bordeaux
- Pas de gain de rendement à Harpenden



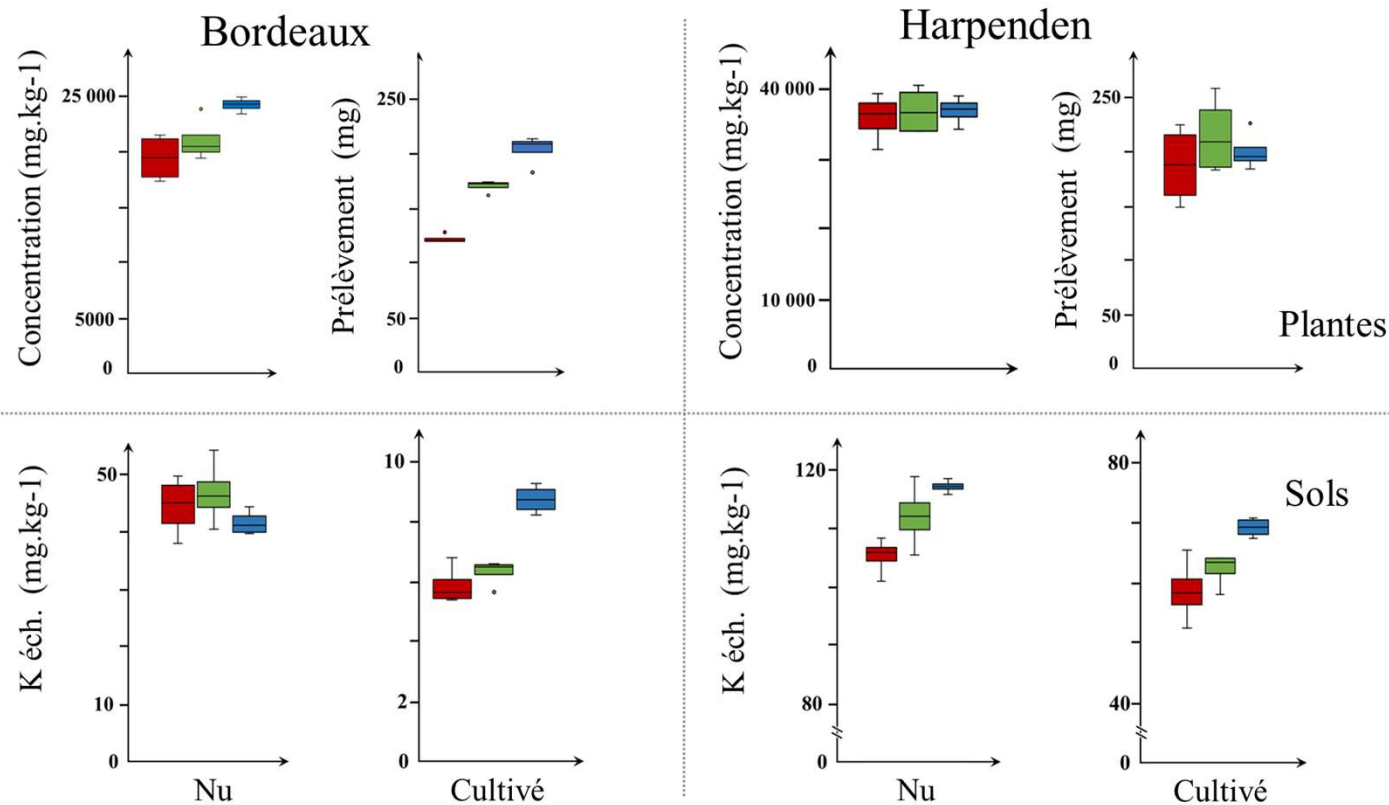
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Le cas du potassium

- Des états initiaux contrastés entre les 2 sites
- Réponse finales différentes pour les plantes
- Augmentation de la disponibilité dans les sols (causes différentes?)



Influences du basalte sur la nutrition minérale

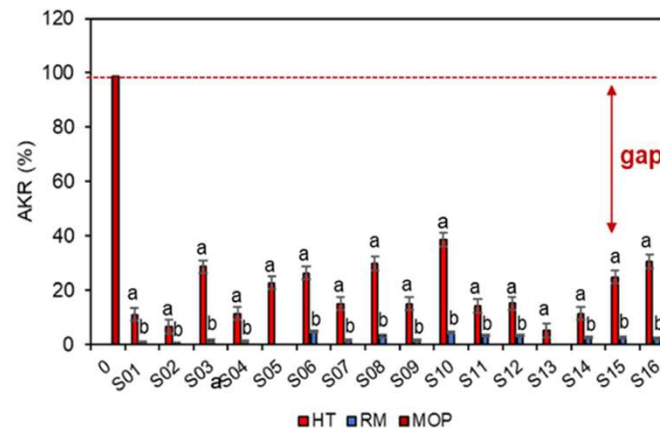
30 ans



Le cas du potassium

- Une efficacité d'utilisation importante à Bordeaux
- Comparable à d'autres essais sur l'altération facilitée
- Néglige, en quelque sorte, les effets indirects dans le cas d'Harpenden

Efficienc e d'utilisation des nutriments	Ca	K	Mg	P
"Bordeaux 80"	0.86%	35.72%	0.38%	5.48%
"Bordeaux 160"	0.28%	30.22%	0.08%	0.88%
"Harpenden 80"	0.28%	26.39%	0.24%	1.65%
"Harpenden 160"	0.16%	6.20%	0.06%	-0.45%



$$AKR(\%) = \frac{K_{\text{treatment}} - K_{\text{control}}}{K_{\text{applied}}} \times 100$$

Hervé et al. 2023

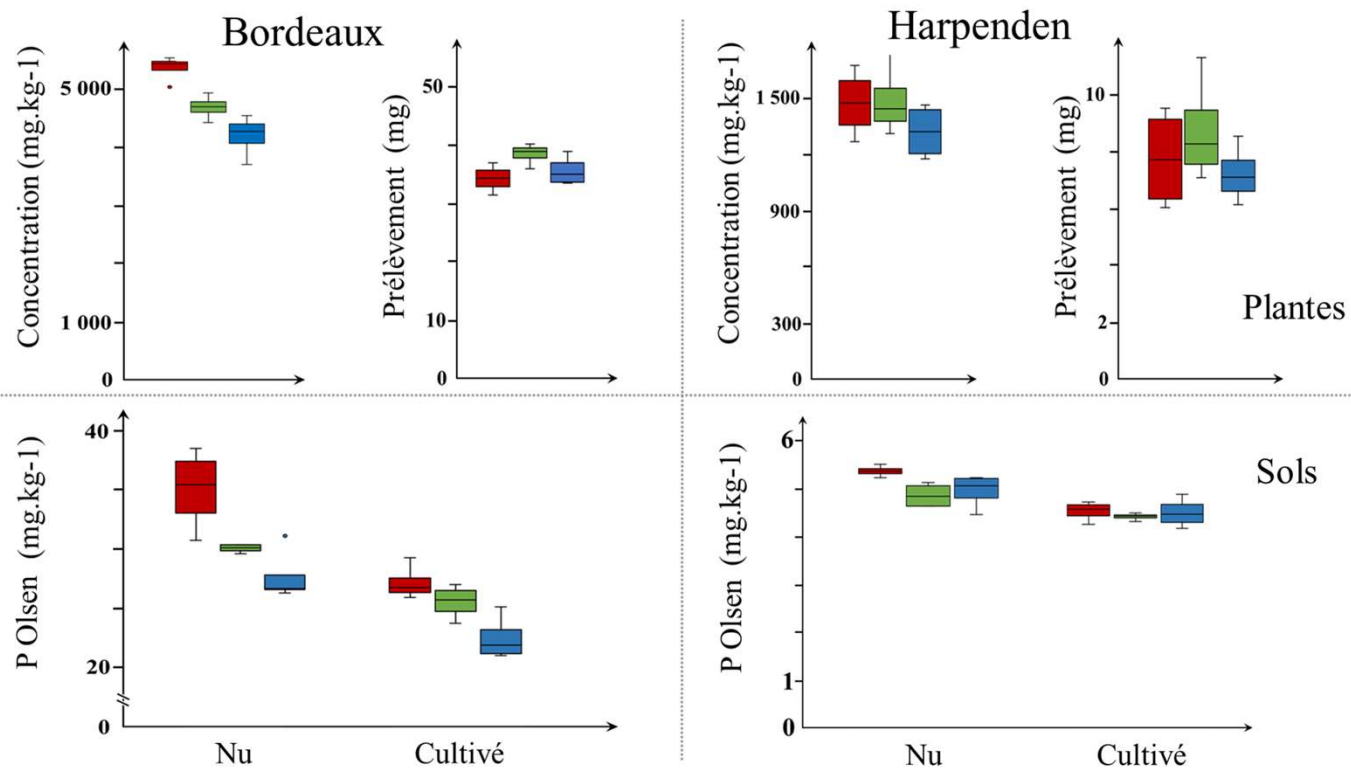
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Le cas du phosphore

- Diminution de la disponibilité à Bordeaux, dans un sol initialement « bien » pourvu
- Diminution dans les plantes à Bordeaux, par dilution
- Pas d'effet à Harpenden malgré plusieurs conditions « favorables »



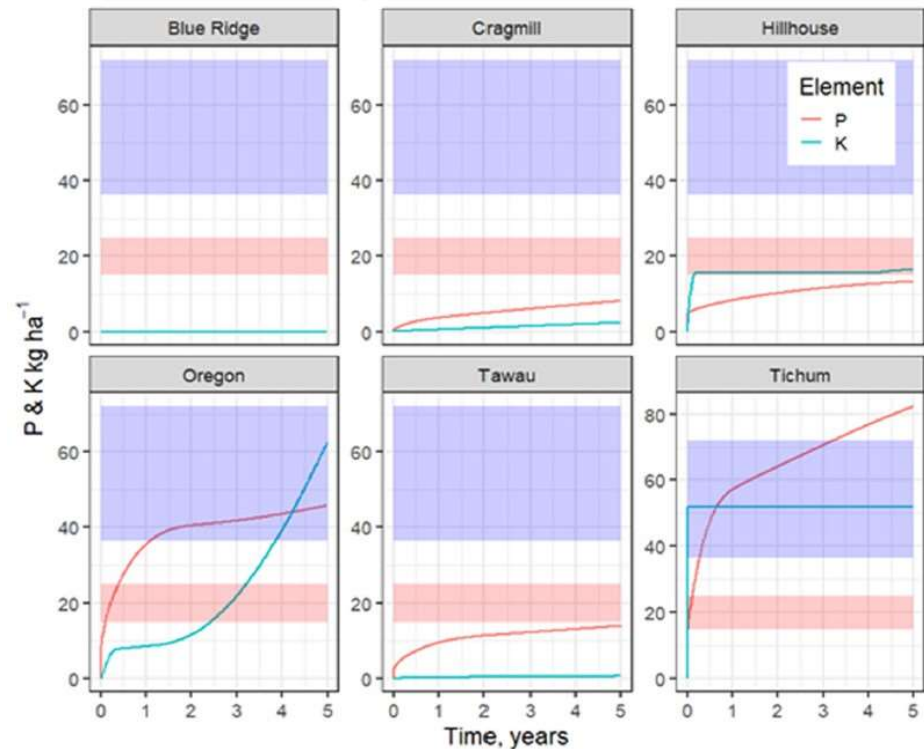
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Le cas du phosphore

- Réponses en contradiction avec les modèles largement évoqués dans la littérature
- Qui prédisent une « rapide » augmentation de la disponibilité
- Un problème de géochimie ou d'agronomie?



Lewis et al. 2021

P (and K) release models for 6 basalts amended in field trials

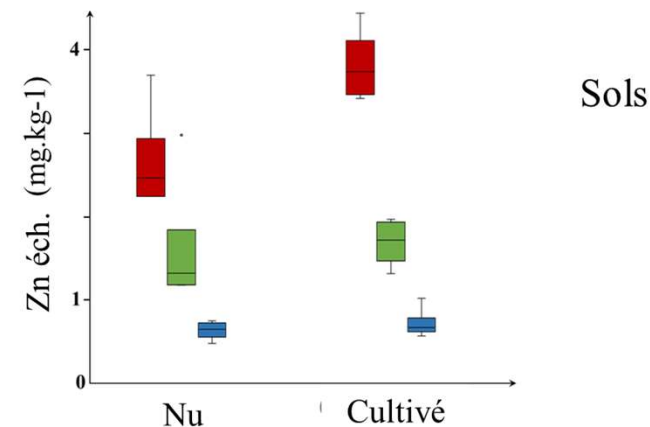
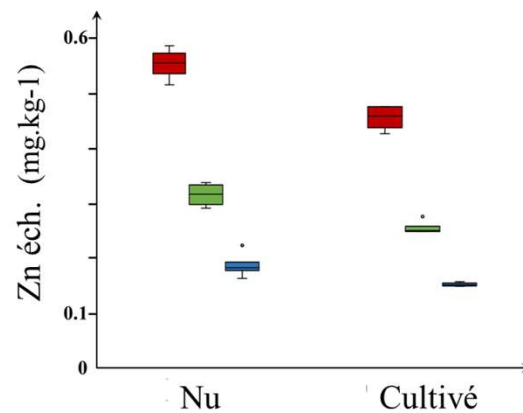
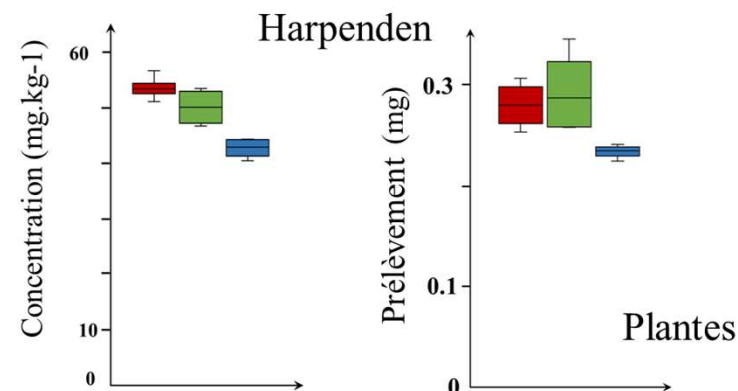
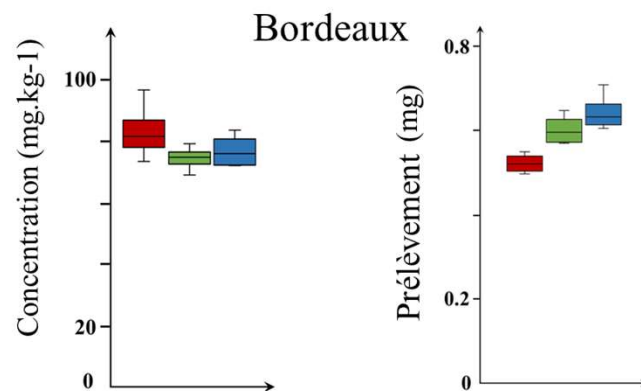
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Le cas du zinc

- Un effet fort, rapide et récurrent sur la disponibilité dans les sols
- Des réponses contrastées dans les plantes
- En contradiction apparente avec le « pool » échangeable dans le sol



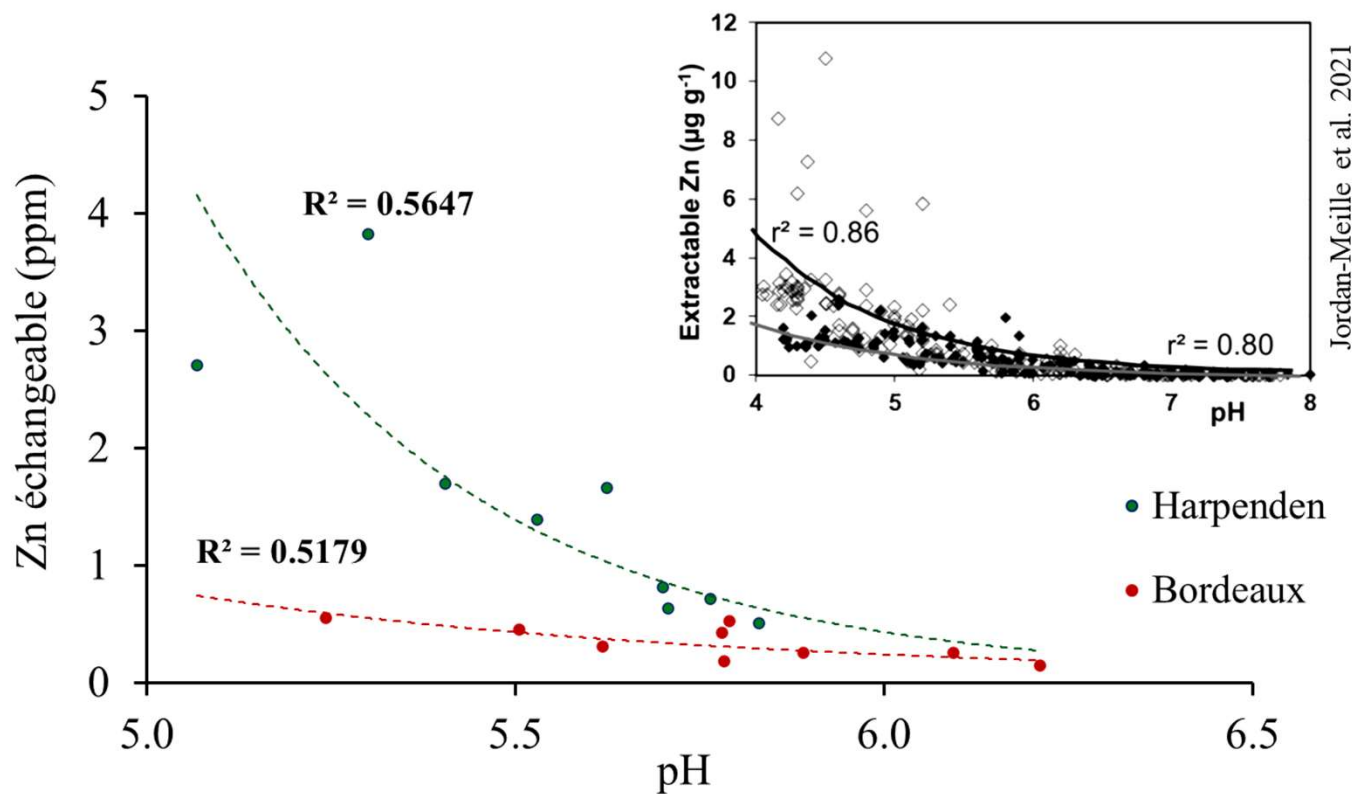
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Zn échangeable et pH

- Une des causes pour la réponse du compartiment échangeable
- N'explique pourtant qu'environ 50% de l'effet



Jordan-Meille et al. 2021

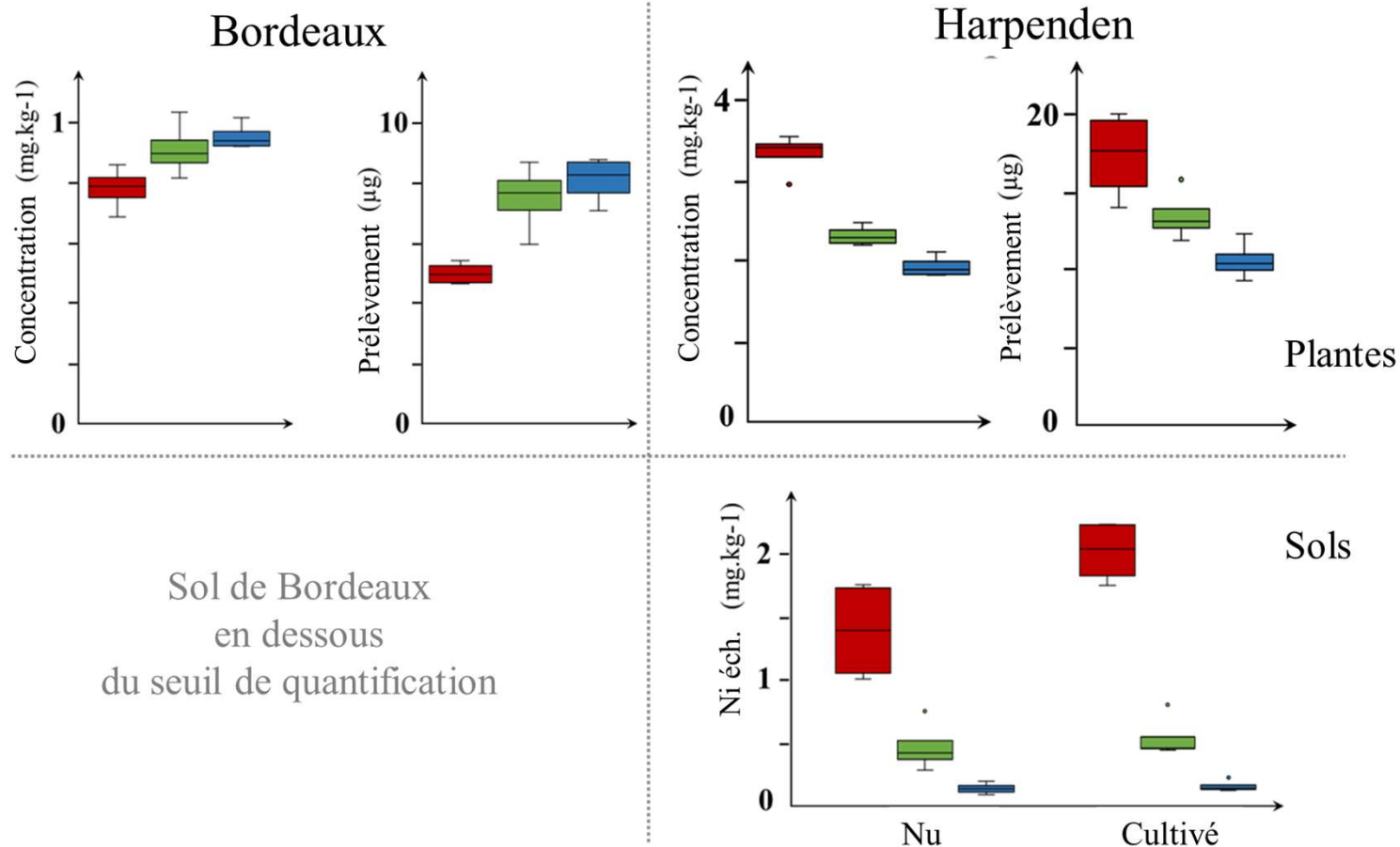
Influences du basalte sur la nutrition minérale

30 ans



Le cas du nickel

- Même motif de diminution rapide de disponibilité dans le sol
- Apparente contradiction de la réponse des plantes à Bordeaux
- Un effet « bénéfique » pour les plantes d'Harpenden



Synthèse des effets sur les échanges minéraux

30 ans



	P		Ca		K		Mg		Mn		Zn		Al		Ti		Ni	
	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP
BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "TOTAL"	>>	>	>>	>>	>>	<	>>	>>	>>	<	>>	>	>>	>	>>	>>	>>	>
BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "DISPONIBLE"	<<	<	>>	>	≈	<	<	≈	>	<<<	<<<	<<<	<<<	<<<	NA	<<<	NA	<<<
MELANGE THEORIQUE VS MESURE INITIALE	≈	≈	≈	>	≈	≈	≈	≈	>	<	<	<	<	<<	NA	NA	NA	NA
CONCENTRATION FINALE SOLS NUS	↓	≈	↑	↑	≈	↑	≈	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	≈	NA	NA	↓
CONCENTRATION FINALE SOLS CULTIVES	↓	≈	↑	↑	↑	↑	?	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	≈	NA	NA	↓
CONCENTRATION DANS LA PLANTE	↓	≈	≈	≈	↑	≈	↓	≈	↓	↓	≈	↓	≈	≈	↑	≈	↑	↓
PRELEVEMENT TOTAL PAR LA PLANTE	≈	≈	↑	≈	↑	≈	≈	≈	↓	↓	↑	↓	↑	≈	↑	≈	↑	↓

Synthèse des effets sur les échanges minéraux

30 ans



	P		Ca		K		Mg	
	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP
BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "TOTAL"	>>	>	>>	>>	>>	<	>>	>>
BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "DISPONIBLE"	<<	<	>>	>	≈	<	<	≈
MELANGE THEORIQUE VS MESURE INITIALE	≈	≈	≈	>	≈	≈	≈	≈
CONCENTRATION FINALE SOLS NUS	↓	≈	↑	↑	≈	↑	≈	↑
CONCENTRATION FINALE SOLS CULTIVES	↓	≈	↑	↑	↑	↑	?	↑
CONCENTRATION DANS LA PLANTE	↓	≈	≈	≈	↑	≈	↓	≈
PRELEVEMENT TOTAL PAR LA PLANTE	≈	≈	↑	≈	↑	≈	≈	≈

- Effets favorisant l'augmentation des éléments majeurs disponibles dans le sol
- Sauf pour le phosphore, contrairement au bénéfice attendu décrit dans la littérature
- Les réponses des plantes sont contrastées

Synthèse des effets sur les échanges minéraux

30 ans



BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "TOTAL"
BASALTE PUR VS SOL PUR ELEMENT "DISPONIBLE"
MELANGE THEORIQUE VS MESURE INITIALE

CONCENTRATION FINALE SOLS NUS
CONCENTRATION FINALE SOLS CULTIVES

CONCENTRATION DANS LA PLANTE
PRELEVEMENT TOTAL PAR LA PLANTE

- Effets diminuant la disponibilité des éléments traces dans le sol
- Sur le court-terme, cinq mois d'essais ou une saison culturale
- Les réponses des plantes sont contrastées

Mn		Zn		Al		Ti		Ni	
BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP	BDX	HARP
>>	<	>>	>	>>	>	>>	>>	>>	>
>	<<<	<<<	<<<	<<<	<<<	<<<	<<<	NA	<<<
>	<	<	<	<	<<<	NA	NA	NA	NA
↓	↓	↓	↓	↓	↓	≈	NA	NA	↓
↓	↓	↓	↓	↓	↓	≈	NA	NA	↓
↓	↓	≈	↓	≈	≈	↑	≈	↑	↓
↓	↓	↑	↓	↑	≈	↑	≈	↑	↓

Synthèse des effets sur les échanges minéraux

30 ans

Risque d'accumulation d'ETM à long terme?

Élément trace métallique			Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr + Cu + Ni + Zn	
Sols	Seuil réglementaire	mg.kg-1	150	100	50	100	300		
	Teneur du sol "Bordeaux"		1.5	2.4	0.7	5.5	5.7		
	Teneur du sol "Harpenden"		26.6	17.7	17.1	37.1	53.8		
Poudre de basalte			19	45	26	10	68	158	
Seuils réglementaires pour l'épandage de boues de STEP	kg.ha-1 pour une période de 10 ans	sur un sol à pH > 6	15	15	3	15	45	60	
		sur un sol à pH < 6	12	12	3	9	30	40	
Apports par l'amendement de poudre de basalte en comparaison de la réglementation sur l'épandage des boues de STEP	40 t.ha-1 (un seul amendement)	apport (kg.ha-1)	0.7	1.8	1.0	0.4	2.7	6.3	
		sur un sol à pH > 6	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	
		sur un sol à pH < 6	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	En dessous	
	160 t.ha-1 (4 années consécutives)	apport (kg.ha-1)	3.0	7.3	4.1	1.6	10.9	25.2	
		sur un sol à pH > 6	En dessous	En dessous	Au dessus	En dessous	En dessous	En dessous	
		sur un sol à pH < 6	En dessous	En dessous	Au dessus	En dessous	En dessous	En dessous	
	400 t.ha-1 (10 années consécutives)	apport (kg.ha-1)	7.5	18.1	10.3	4.0	27.2	63.1	
		sur un sol à pH > 6	En dessous	Au dessus	Au dessus	En dessous	En dessous	Au dessus	
		sur un sol à pH < 6	En dessous	Au dessus	Au dessus	En dessous	En dessous	Au dessus	
	Temps pour atteindre le seuil réglementaire (années)			20	8	3	37	17	10

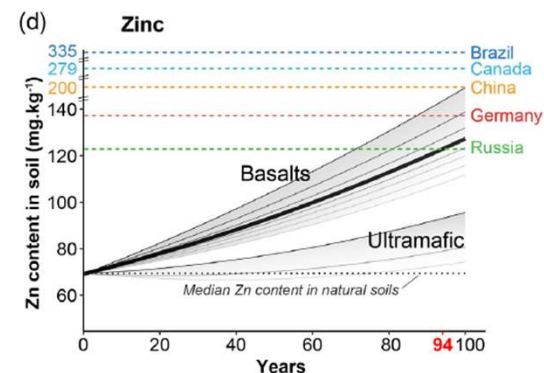
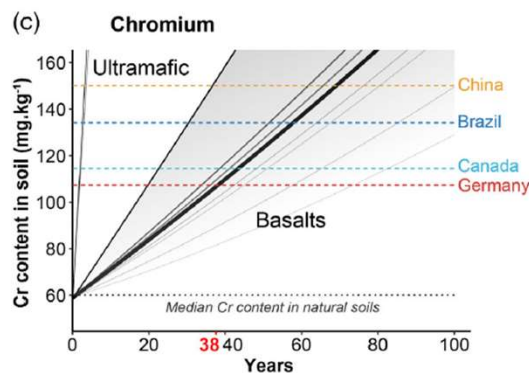
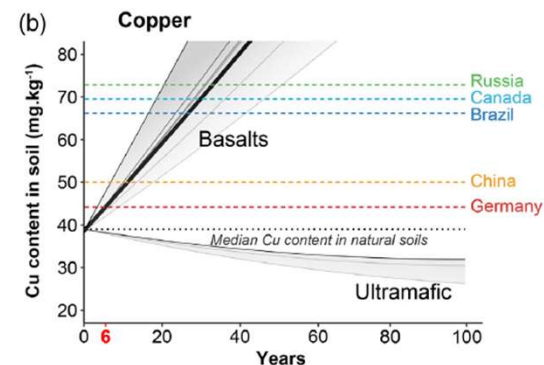
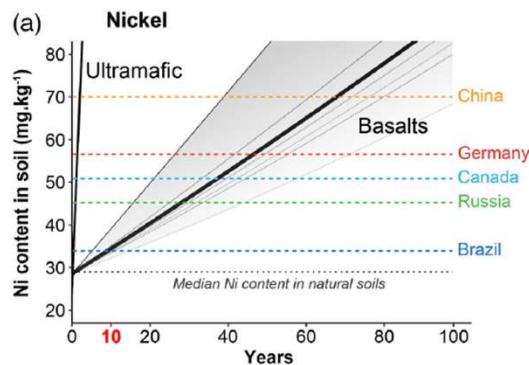
Synthèse des effets sur les échanges minéraux

30 ans



Risque d'accumulation d'ETM? Comparaison à la littérature

- 2 méthodes différentes
- **Cuivre et zinc** dépassent les réglementations
- Dans une période du même ordre de grandeur: **une décade**
- Une controverse actuelle dans la littérature



Accumulation progressive des ETM à partir d'un amendement annuel répété de 40 t.ha⁻¹

Dupla et al. 2023

Conclusion

30 ans



- Effets marqués à une échelle de temps courte, **compatible avec celle de l'agriculture**
- Une partie importante de ces effets ne semble **pas issue de l'altération** pendant les essais
- Un défi à relever: **faire correspondre les disciplines**, les échelles de temps et les échelles spatiales, de la géochimie jusqu'à l'agriculture
- Alors que la **commercialisation et le déploiement** sont déjà en cours





30^{ans}



Merci pour votre attention

Références bibliographiques

30^{ans}

- Beerling, D.J. et al. (2020) 'Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands', *Nature*, 583(7815), pp. 242–248. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.
- Berner, R.A. (1992) 'Weathering, plants, and the long-term carbon cycle', *Geochimica et Cosmochimica Acta*; 56, pp.3225-3231
- Carbon Drawdown Initiative. Available at: <https://www.carbon-drawdown.de>
- Dupla, X. et al. (2023) 'Potential accumulation of toxic trace elements in soils during enhanced rock weathering', *European Journal of Soil Science*, 74(1), p. e13343. Available at: <https://doi.org/10.1111/ejss.13343>.
- Jordan-Meille, L. et al. (2021) 'The grain mineral composition of barley, oat and wheat on soils with pH and soil phosphorus gradients', *European Journal of Agronomy*, 126, p. 126281. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126281>.
- Leonardos, O.H., Fyfe, W.S. and Kronberg, B.I. (1987) 'The use of ground rocks in laterite systems: An improvement to the use of conventional soluble fertilizers?', *Chemical Geology*, 60(1), pp. 361–370. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4).
- Lewis, A.L. et al. (2021) 'Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering', *Applied Geochemistry*, 132, p. 105023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105023>.
- Manning, D.A.C. and Theodoro, S.H. (2020) 'Enabling food security through use of local rocks and minerals', *The Extractive Industries and Society*, 7(2), pp. 480–487. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>.
- Manning, D.A.C. (2015) 'How will minerals feed the world in 2050?', *Proceedings of the Geologists' Association*, 126(1), pp. 14–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>.
- Schuiling, R.D. and Krijgsman, P. (2006) 'Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester Co₂', *Climatic Change*, 74(1), pp. 349–354. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3485-y>.
- Swoboda, P., Döring, T.F. and Hamer, M. (2022) 'Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review', *Science of The Total Environment*, 807, p. 150976. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.
- UK Enhanced Rock Weathering GGR Demonstrator (2022). Available at: <https://www.sheffield.ac.uk/uk-enhanced-weathering>

30 ans

16^e Rencontres

DE LA FERTILISATION RAISONNÉE ET DE L'ANALYSE

21, 22 et 23 novembre 2023

Palais des congrès de Tours

comifer

Gemas