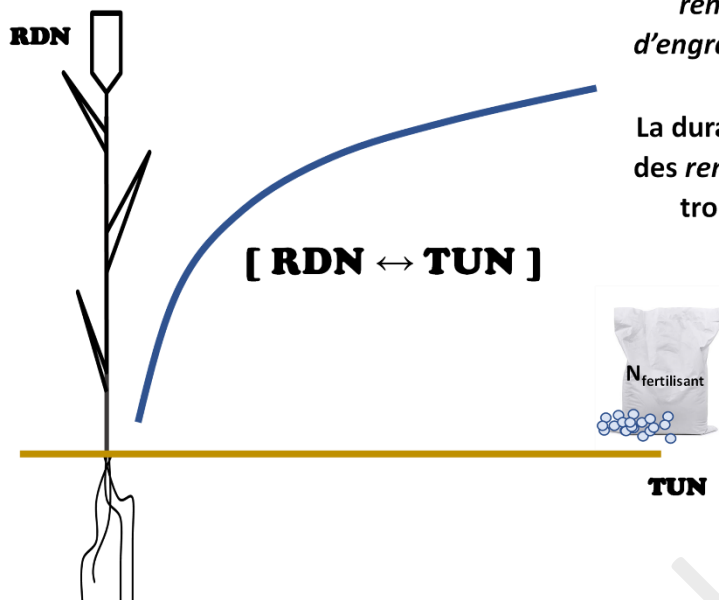


AgroNum™ : une parcelle → une courbe de réponse- $N_{\text{fertilisant}}$



La courbe de réponse **AgroNum** ajuste les objectifs de rendements azotés **RDN** ($\text{kg-N}_{\text{grain}}/\text{ha}$) aux doses d'engrais azotés **TUN** ($\text{kg-N}_{\text{fertilisant}}/\text{ha}$), et vice versa.

La durabilité des couples **RDN** ↔ **TUN** est assurée par des rendements unitaires **RUN** ($\text{kg-N}_{\text{grain}}/\text{kg-N}_{\text{fertilisant}}$) ni trop élevés/faibles sélectionnés par **AgroNum**.

... et cela, à travers l'Europe ;

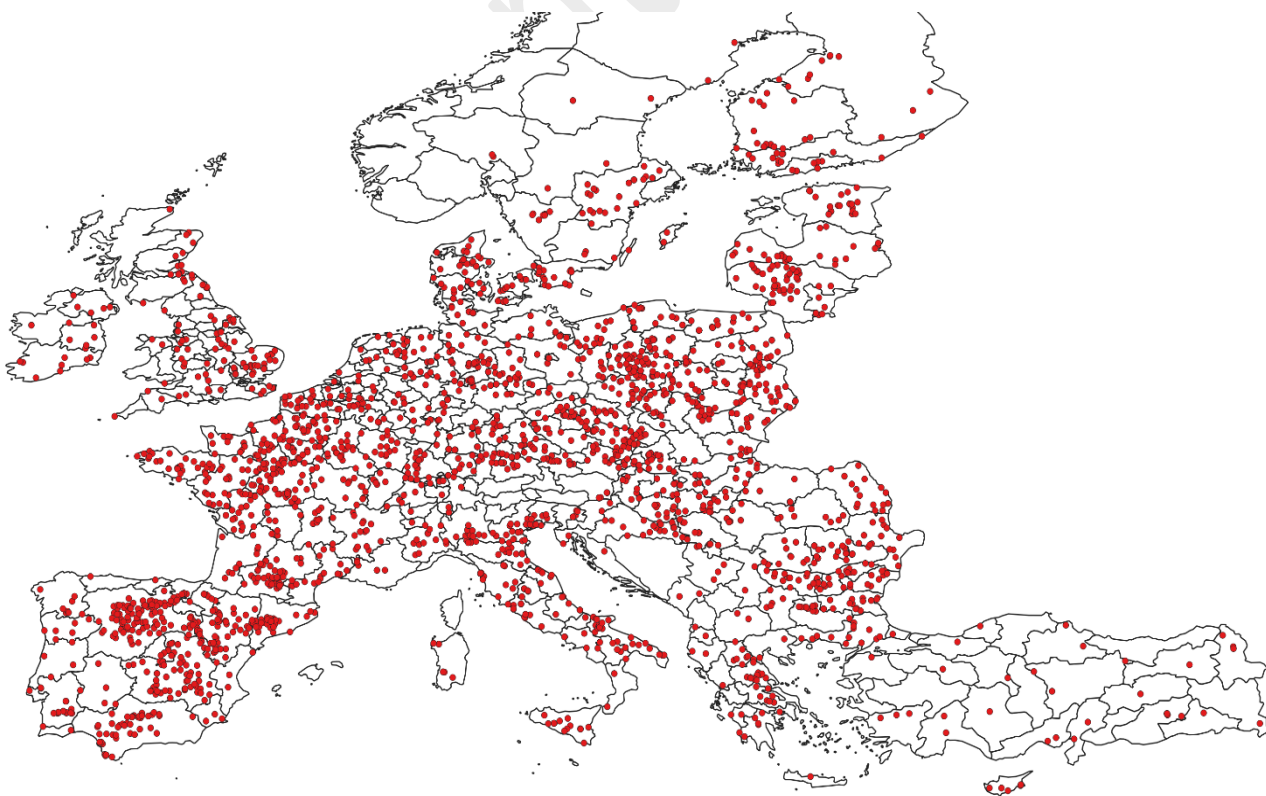


Table des matières

Introduction

Préambule

Élaboration des courbes de réponses AgroNum™

- Dynamique de la conservation de la MOS
- Notions d'iSQ et RSQ
- Caractérisation des courbes de réponse [« *root, shape & rate* »]
- Améliorations proposées

Préparation des plans de fertilisation

- Couplage aux fonction PKH
- Contraintes
- Sans prélèvement des sols de la parcelle
- Exemple de plans de fertilisation

Validation agronomique et numérique

Références citées dans le texte

Introduction

L'amélioration des *rendements unitaires de l'azote fertilisant*, RUN (alias NfUE, *nitrogen use efficiency*), est le facteur le plus capable d'assurer la durabilité des systèmes de production en grandes cultures non-*Fabaceae* (Mulvaney et al. 2008, Lugato et al. 2018, Gao et al. 2023, Ladha et al. 2020, etc.). Les rendements unitaires RUN trop faibles ou élevés ont été systématiquement supprimés de la base de données AgroNum™. Il en résulte que les reliquats d'azote post-récolte sont minimes et que les résidus de cultures cellulosiques auront suffisamment d'azote pour s'humifier correctement en matière organique stable du sol.

Les RUN doivent donc être de sorte que les rendements azotés RDN ne privent pas la paille d'azote [*soil mining*, angl.], tout en minimisant les reliquats d'azote post-récolte. Les teneurs en azote du grain et de la paille doivent donc être couplées de manière à ce que ces fonctions en puissance selon les taux de fertilisation azotée TUN aient les mêmes *coefficients-b*.

Le rapport des *coefficients-a* initiaux de ces fonctions en puissance est constant. À faibles taux de fertilisation TUN, ces coefficients-a indiquent la capacité des azotobactéries du sol à fournir durablement un minimum d'azote au rendements azotés RDN. Les coefficients-a dérivés d'AgroNum™ sont très similaires à ceux obtenus à partir d'expérimentations à long terme. La forme des courbes de réponse AgroNum™, elles aussi fonctions en puissance, est donc analogue à celles provenant d'expériences longues-durées. Les courbes de réponse à l'azote fertilisant plus conventionnelles sont, elles, plus linéaires, voire quadratiques, en raison de la persistance d'importants reliquats d'azote minéral post-récolte.

De faibles reliquats post-récolte et une paille suffisamment riche en N sont donc propices à la conservation de la matière organique du sol. En raison du couplage susmentionné des rendements azotés en grain & en paille, et de ratios C/N de la matière organique stable du sol d'environ 8 à 10, les stocks de carbone organique du sol seront conservés.

Les rendements azotés RDN préconisés par AgroNum™ et leur taux de fertilisation TUN correspondants contribuent à la sécurité alimentaire. Les rendements azotés RDN sont en moyenne $\approx 33\%$ plus élevés que les moyennes régionales conventionnellement utilisées à titre d'objectifs de rendement. Cela cadre bien les écarts de rendements en production céréalières.

AgroNum™ est de l'intelligence collective (IC) réalisée par intelligence artificielle (IA). Ces technologies garantissent l'exactitude et la précision (Figure 10) des objectifs de rendements RDN AgroNum™ et des taux de fertilisation azotée TUN correspondants. Elles sont donc beaucoup plus applicables en conseil agricole que les habituelles démonstration technico-commerciales et/ou modèles complexes.

L'interopérabilité d'AgroNum™ avec l'agriculture de précision et les prévisions dynamiques des rendements est nouvelle, innovante et brevetable. Le rehaussement des courbes de réponse RDN/TUN AgroNum™ sera avantageusement assurée à l'aide des technologies de *fertilisation azotobactérienne* depuis brevetées par Polyor SAS. Un tel progrès technique des rendements azotés RDN selon les taux de fertilisation azotée TUN génère des *crédits azote remboursables*. Polyor SAS développe un protocole standard bientôt certifié pour dériver de tels crédits facilement convertibles en crédits carbone telluriques plus conventionnels.

À titre d'alternative pour le calcul des taux de fertilisation azotées, TUN (kg-N_fert/ha) en fertilisation raisonnée, AgroNum™ a l'avantage d'être précis, impartial, dynamique, simple d'utilisation et - surtout, durable. La précision d'AgroNum™ est assurée par des algorithmes d'IA plus prédictifs que les habituelles méthodes algébriques. De plus, AgroNum est impartial parce qu'il n'est pas nécessaire de décrire en détails les pratiques culturales puisque seul le rendements azotés, RDN (kg-N_grain/ha) dicte le niveau de durabilité de l'itinéraire technique.

AgroNum™ permet aussi l'ajustement dynamique intra-annuel selon la météo, et intra-parcellaire selon l'hétérogénéité de la parcelle, de ces objectifs de rendements azotés durables, RDN. Enfin, AgroNum™ est (très) simple d'utilisation, l'agriculteur/trice n'ayant qu'à indiquer les coordonnées GPS les plus au centre de la parcelle.

Les objectifs de rendements azotés, RDN, préconisés par AgroNum™ sont durables parce qu'ils assurent non seulement la réduction des reliquats d'azote post-récolte, mais aussi l'enrichissement progressif en azote des résidus de culture assurant ainsi leur l'humification en matière organique stable. Pour ce faire, AgroNum™ identifie pour chaque parcelle les RDN aux rendement unitaires, RUN ($\text{kg-N}_{\text{grain}}/\text{kg-N}_{\text{fertilisant}}$) ni trop faibles, ni trop élevés.

Du coup, plusieurs constats, parfois déconcertants, seront faits, à savoir ;

- ✓ Les courbes de réponse de rendements grains azotés durables, RDN, sont plus abrutées et en puissance, que quadratiques ou linéaires ;
- ✓ C'est la diazotrophie non-symbiotique, azb, qui, à faible taux de fertilisation azotée, TUN, dicte la durabilité des rendements ;
- ✓ A plus hauts taux de fertilisation azotée, c'est l'enrichissement progressif en azote des résidus de culture qui assure leur humification ;
- ✓ Ne connaissant pas précisément les stocks de carbone, il s'agit surtout d'assurer la conservation de la matière organique du sol ;
- ✓ Il faut donc que les RDN soient proportionnels par rapport aux retours d'azote au sol par les résidus de culture celluloseux et pailleux ;
- ✓ Pour ce faire, les itinéraires techniques doivent de facto exclure les rendements unitaires, RUN, trop faibles et trop élevés ;
- ✓ Un algorithme conçu à cet effet, AgroNum™, calcul pour chaque parcelle les *besoins unitaires*, a_{AgroNum} , des itinéraires les plus durables ;
- ✓ Cette notion d' a_{AgroNum} permet de rétro-calculer selon TUN les objectifs de RDN durables rapportés sous forme de courbes de réponse à l'azote, CRP_N.
- ✓ A terme, le progrès technique et le rehaussement des courbes de réponse AgroNum™ déterminera le nombre de crédits azote intégrés durablement dans la matière organique du sol.

Ces courbes de réponses AgroNum™ sont applicables à l'ensemble des grandes cultures non-*Fabaceae* y compris et, notamment, les céréales d'hivers et de printemps, le colza, le maïs et le tournesol. L'approche et validée par méta-analyses des susdits constats sur la base de nos connaissances actuelles en agronomie, par exemple que les reliquats d'azote post-récolte sont surtout le fait de rendement unitaires trop faibles, que ceux-ci vont enrichir la solution du sol en azote et favoriser l'attaque microbienne de la fraction carbonée de la matière organique, ou encore que les résidus de culture s'enrichissent en N selon le taux de fertilisation azotée.

AgroNum™ a été essayée pour l'Europe en compilant 40 000 itinéraires techniques géoréférencés et amène des augmentations des rendements $\approx 40\%$ en accord avec les écarts de rendements constatés par Schils et al. 2018 en production céréalière dans l'EU.

Les parcelles avec des rendements proches des préconisations AgroNum™ ont des indices pédoclimatiques plus favorables à la conservation de la matière organique du sol. Cette méta-analyse, bien que statistiquement indéfendable, appuie néanmoins les prétentions d'AgroNum™ en ce qui a trait à l'effet bénéfique des itinéraires techniques aux rendements unitaires adaptés.

La précision du fonctionnement de l'algorithme AgroNum™ a, elle, été validée à l'aide d'un sous-ensemble de 15% des parcelles comprises dans le jeu de données comprenant que les itinéraires les plus durables au sens entendu. Cette approche stochastique démontre la puissance de cette forme « d'intelligence artificielle » appliquée à l'agriculture durable.

Préambule

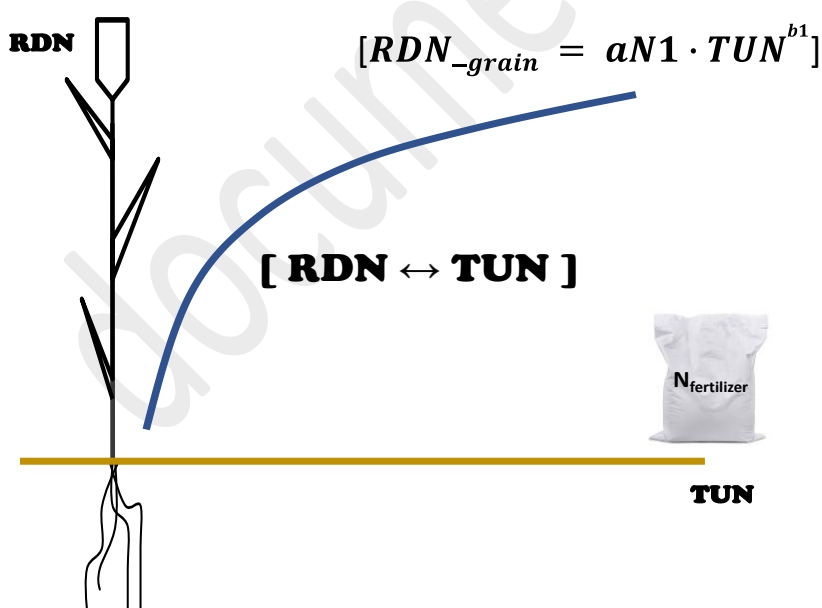
En conseil agricole seules quelques data agronomiques sont soit données – RDT, et TUNPK, soit estimables par échantillonnage et inférence statistiques – teneurs en MS, N, P & K des grains récoltés. Le reste des autres variables communément rapportées sur des bulletins d'analyses au niveau de la parcelles sont trop imprécises du fait de l'hétérogénéité des sols pour effectuer des bilans massiques et/ou des plans de fertilisation NPK.

Les plans de fertilisation ne génèrent pas de très grandes marges pour l'agriculteur/trice, de l'ordre de quelques dizaines d'euros par hectare et par années. Il est donc important de réduire au maximum les coûts et la charge de travail – mental notamment, lors de la réalisation de ces plans. Le principal souci du développeur sera d'assurer un maximum d'ergonomie via un minimum d'informations à renseigner par l'utilisateur.

Cela dit, les algorithmes dits d'intelligence artificielle (IA) sont cependant particulièrement bien adaptés, voire expressément conçus, pour traiter et valoriser ce type de variables foncièrement imprécises – dites parfois « classificateurs faibles », mais néanmoins porteuses d'information à défaut de données à proprement parler. Reconnaître cette dualité data ↔ classificateurs implique appartenir à l'une ou l'autre de « deux cultures » (Breiman, 2001).

Enfin, ces plans de fertilisation NPK doivent amener un certain progrès technique (pTec) capable de réduire – et non d'augmenter, les écarts de rendements (*yield gaps*, angl.). La durabilité par voie de conservation de la matière organique du sol (MOS) doit être compatible avec une *intensification des itinéraires techniques* (itec). Ce constat est aussi celui de Schils et al. 2018 pour ce qui est de la production céréalière européenne. Nous y reviendrons.

L'approche dite ici AgroNum™ proposée par Polyor SAS (www.polyor.eu) est basée sur la prise en compte de ces quatre (4) réalités agronomiques, statistiques et numériques à défaut de revenir inexorablement aux problèmes limitants actuellement le développement de la fertilisation raisonnée et l'agriculture bas carbone. *In fine*, le nombre de prélèvements de sols va *augmenter* quitte à alimenter lesdits algorithmes d'IA plutôt que les bulletins d'analyses.

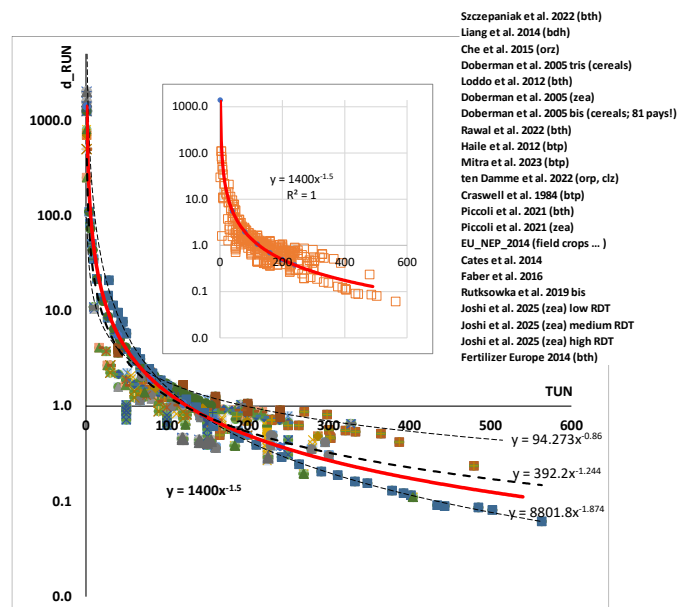


Les courbes de réponse à l'azote fertilisant AgroNum™ (www.polyor.eu) au niveau de la parcelle décrivent les rendements protéiques RDN (kg-N_{grain}/ha) et les taux de fertilisation azotée TUN (kg-N_{fertilisant}/ha) conduisant à la conservation de la *matière organique du sol* (MOS ; EP4252516). Ce concept bien connu (EUNEP 2014/2016, Brentrup & Palliere 2010, etc.) est maintenant mieux implémenté via AgroNum à l'aide d'intelligence artificielle

collective (Breiman 2001, Lévy 2003). En effet, les rendements unitaires RUN (kg-N_{grain}/kg-N_{fertilisant}), y compris selon la méthode du bilan, sont souvent soit trop élevés ou trop faibles conduisant donc à un épuisement de la MOS ou à un risque de pollution nitrique des nappes phréatiques.

Élaboration des courbes de réponse AgroNum™

La dynamique, ou plutôt la conservation, de la matière organique du sol (MOS) est surtout affectée par la mobilisation, l'exportation et la restitution de l'azote plutôt que celles du phosphore, potassium ou soufre. Cela est le fait de la stœchiométrie CNPKS et l'histologie des



résidus de culture au sol (RCS) ; nous y reviendrons. Il y a deux composantes à cette dynamique. La première est l'efficacité I/O ou « pondérale » de l'azote fertilisant (d_{RUN}) selon le taux de fertilisation N (TUN), relation empirique & générique obtenue par métanalyse (**Figure 1**, ici à gauche). La deuxième est le rendement unitaire (UN/ha) de cet azote fertilisant lorsque TUN est *approximativement* zéro (run), valeurs empiriques elles aussi obtenues par méta-analyses (moyenne de 37,5 UN/ha/année) d'expérimentations longue-durées (ELD, **Figure 2**, ci dessous ; Nb. Pour éviter la surcharge, les références citées ne sont listées dans la bibliographie.).

Notons dès maintenant que les valeurs moyennes d_{RUN} et run à très faibles valeurs de TUN ≈ 1 peuvent être mises en relation ainsi ;

$$[run^2 \approx d_{RUN} \approx 1400] \mid \approx TUN_0$$

Cela implique nécessairement que ;

$$\left[\frac{run^2}{d_{RUN}} \approx 1 \right]$$

soit une première appréciation de la conservation de la MOS à titre d'indice de durabilité de l'itinéraire technique (itec) selon l'efficacité de la fertilisation azotée.

Cette appréciation de l'importance de l'efficacité de la fertilisation azotée est connue (EUNEP 2016, www.eunep.org) mais mal implémentée ne conseil agricole, d'où la présente invention.

Cela dit, pour le moment il ne s'agit donc que de valeurs moyennes à TUN ≈ 0 , ou plutôt 1 comme nous le verrons. Pour généraliser ce rapport (appréciation) à l'ensemble des parcelles dont les potentiels de rendement – la « fertilités » ou encore « productivités », sont inhéremment différents (variables) il faut l'ajuster de la sorte ;

$$[((run^2)/d_{RUN})/iSQ]$$

iSQ est un quelconque indice connu de la productivité du sol de la parcelle. Nous devons introduire deux nouveaux termes ; $RUN = [run^2/d_{RUN}]$, i.e. l'efficacité de l'azote fertilisant ajustée selon d_{RUN} et donc TUN (Figure 1), et $RSQ = RUN/iSQ$ à titre de référence AgroNum qui servira ici à sélectionner les itinéraires techniques conduisant le plus à la conservation de la matière organique du sol (MOS).

Référence (culture)	latitude	longitude	aN1_AgroNum	aN1_LTE (ELD)
Johnston et al. 2018 (BTH)	51.81056	-0.36927	43.1	45.0
Kolmanic et al. 2022 (AVN)	46.50303	15.63330	29.0	30.0
Kubat et al. 2003 (CER)	50.08882	14.29138	41.4	41.0
Korschens et al. 2012 (CER)	46.74180	17.23990	36.3	42.0
Shejbalova et al. 2014 (ORP)	49.55442	15.35057	43.0	46.0
Shejbalova et al. 2014 (ORP)	50.07404	14.17245	42.8	43.7
Lopez-Bellido et al. 2001 (BTH)	37.75978	-4.52902	29.0	35.0
Anastasi et al. 2019 (BDH)	37.38228	15.02198	29.3	31.0
Korschens et al. 2012 (CER)	50.80129	10.22457	42.3	45.0
Pepo et al. 2016 (BTH)	47.55693	21.44690	36.5	41.2
Plaza-Bonilla et al. 2021 (BTH)	41.81180	1.16597	29.0	33.0
Amosse et al. 2013 (BTH)	44.61535	5.43880	30.0	31.0
Amosse et al. 2013 (BTH)	44.64879	4.88194	30.0	31.0
Poma et al. 2004 (BDH)	37.63686	13.76517	27.0	25.5
Jolankai et al. 2006 (BTH)	46.73393	17.23108	36.0	34.0
Anastasi et al. 2019 (BDH)	37.38226	15.02198	29.3	35.0
Dumbrava et al. 2016 (TRC)	44.50001	26.25716	34.0	38.0
Cerny et al. 2010 (CER)	49.55635	14.97752	41.5	40.7
Fiorentini et al. 2021 (BDH)	43.54308	13.36529	31.0	31.0
Nevens et al. 2005_BE23 (ZEA)	50.98512	3.81723	47.1	52.5
Van Grinsven et al. 2022 (BTH)	51.81056	-0.36927	43.1	43.8
Knapp et al. 2023 (BTH)	47.50258	7.53934	33.5	38.6
Rutkowska et al. 2019_GRB (ZEA)	51.34857	21.66833	41.0	41.4
Rutkowska et al. 2019_BRK (ZEA)	52.58339	16.64572	39.5	47.3

Or, pour généraliser ainsi RSQ on choisi de *fixer* (tenir constant, angl.) $d_{RUN} = f(TUN)$ (Figure 1) et varier iSQ à titre d'indice de productivité du sol. À ce stade il est avantageux d'utiliser iSQ tel que proposé par Toth et al. 2017 qui à l'immense avantage d'être géoréférencé au niveau de la parcelle (250m x 250m) à travers la SAU européenne. On doit aussi *redéfinir* run à $TUN \approx 0$ comme **aN1**, valeur unique spécifiée pour chaque parcelle de manière à laisser varier l'efficacité simple de l'azote fertilisant, run, selon le taux de fertilisation azotée et englober ainsi l'ensemble des itec conventionnels, y compris et surtout les plus intensifs. Standardiser ainsi $d_{RUN} = f(TUN)$ quitte à définir aN1 permet d'éviter des erreurs d'estimation d'ordre géométriques à très faible TUN au profit d'erreurs d'ordre arithmétique affectant iSQ.

On peut maintenant rétro-calculer de RSQ un certain besoin unitaire – a_AgroNum de l'itec fonction de TUN de manière à ce que ;

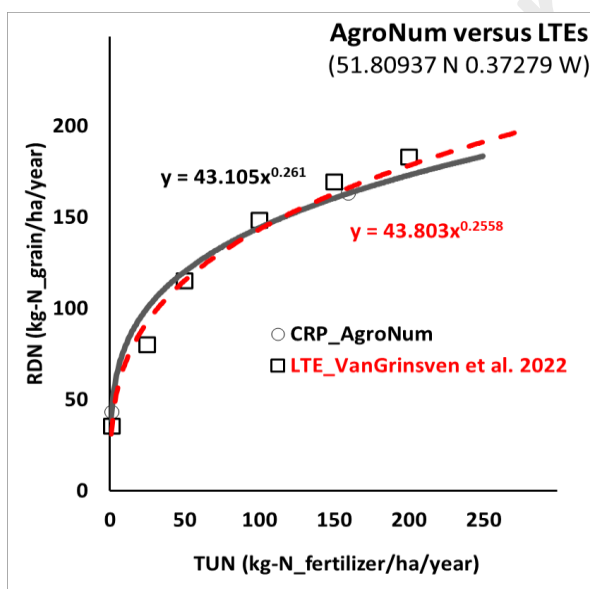
$$RDNi = TUNi / a_{AgroNum}$$

$$TUNi = RDNi \times a_{AgroNum}$$

On obtient ainsi pour chaque objectif de rendement azoté RDNi un taux de fertilisation azoté TUNi correspondant repérable sur la courbe de réponse (Figure 3). Formellement, et sachant que RUN est le produit de RSQ prédit et iSQ donné ;

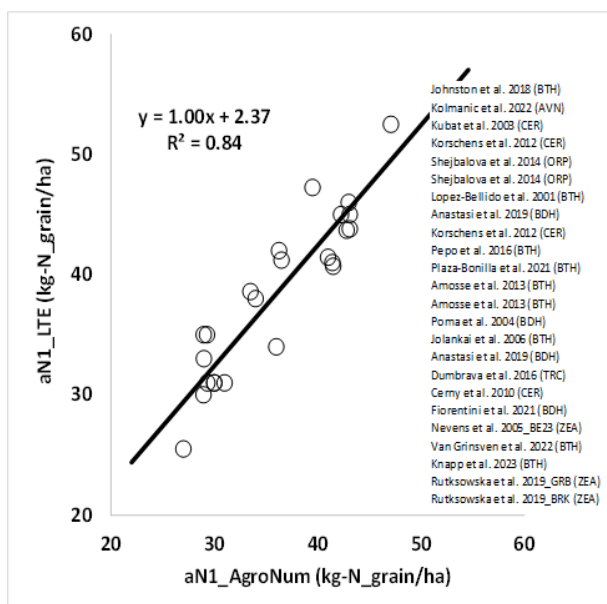
$$a_{AgroNum} = \frac{1}{\sqrt{RUN \cdot d_{RUN}}}$$

Notons ici que ce rétro-calcul d'a_AgroNum ($a_{AgroNum}$) à partir des RSQ prédits par l'algorithme d'IA AgroNum n'est possible que si $RUN = run^2/d_{RUN}$; Préciser run^2 permet non seulement d'éviter lesdites erreurs géométriques mais est aussi mathématiquement nécessaire. Ce plus, définir $RSQ = RUN/iSQ$ réduit le risque de dérive numérique puisque iSQ et d_{RUN} évoluent en sens inverse selon le productivité de la parcelle et donc de TUN.



Cette réponse durable des rendements azotés RDN selon l'augmentation de la fertilisation azotée TUN. Elle possède trois caractéristiques ; i) une racine aN1 (*root*), ii) une forme (*shape*) de fonction en puissance aY^b et iii) un taux (*rate*), b, comparable à celui pour la fonction décrivant l'azote résiduel restitué au sol par les résidus de culture de grandes cultures à graines non-Fabaceae. Cette forme abrute de type AgroNum de ces courbes de réponse en puissance est caractéristique de celles provenant de parcelles expérimentales longue durée et donc synonyme de durabilité (**Figure 3** ; ici à gauche). Les racines aN1-ici d'environ 43, sur parcelles longue durée sont comparables à celles calculée par AgoNum pour ces mêmes parcelles (**Figure 4** ; page suivante) ;

Nb. Pour éviter la surcharge, les références cités en abîme ne sont listées dans la bibliographie. Enfin, il est démontrable empiriquement par méta-analyse (**Figure 5** ; page suivante) que les coefficients $b_2 \approx 0.2500$ à titre de taux d'augmentation des courbes de ces courbes de réponse en puissance de type AgroNum sont effectivement comparable à ceux observés lors de l'accumulation et la restitution de l'azote desdits résidus de culture ; Nb. Encore une fois et pour éviter la surcharge bibliographique, les références cités en abîme ne sont pas listées.



Les valeurs RSQ ayant été sélectionnées de la base de données (dbase) AgroNum de manière à retenir que les RUN ni trop élevés, ni trop faibles conduisent nécessairement à une certaine conservation de la MOS en évitant les situations provoquant son attaque microbienne (cf. EUNEP 2016). Les itec donnant des RDN sur ou proche de cette courbe de réponse AgroNum conduisent donc eux aussi à la conservation de la MOS.

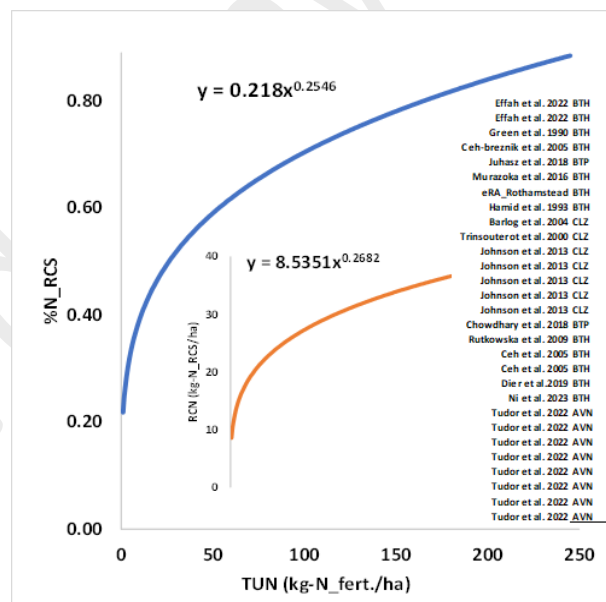
Ayant « standardisé » $dRUN = f(TUN)$ c'est iSQ qui affectera maintenant le plus la position de la courbe de réponse à l'azote spécifique à la parcelle. Cela est pragmatique du fait qu'établir précisément $dRUN = f(TUN)$ et donc aN1 pour $TUN \approx 0$ pour chacune des parcelle impliquerait

qu'il y aurait une expérimentation *longue durée* sur chaque parcelle agriculteur. iSQ, au contraire est, lui, estimable et estimé au niveau de la parcelle.

Or, iSQ selon Toth et al. 2017 demeure imparfait. Pour tenir compte de cette imperfection, voire éventuellement y remédier, on peut ;

- 1) *Trouver un autre indice « qualité » ou « santé » des sols* : Il existe une pléthore de tels indices, souvent fort complexes (Auréa Agrosociences 2025, Perrin et al. 2023, Tscheiller et al. 2025, etc.). Il n'est pas évident comment cela contribuera à rendre plus ergonomique ou précis le conseil agricole et, contrairement à iSQ_Toth et al. 2013, ces indices ne sont pas géoréférencés à travers l'Europe.
- 2) *Améliorer iSQ_Toth et al. 2013* : Nous avons effectivement constaté qu'iSQ est souvent sous-estimés pour les parcelles aux rendements agronomiques relativement faibles. Il n'est pas pour autant du recours de Polyor SAS de se substituer ainsi Toth et al. 2013 en modifiant leur indice fruit d'une imposante recherche institutionnelle européenne.
- 3) *Sélection réitérative (EP4252516)* : Cette forme d'intelligence artificielle *collective* permet de mieux tenir compte de l'incertitude qu'engendre l'imperfection d'un quelconque iSQ. Les bases mathématiques et numérique de cette approche sont en cours d'affermissement via une prestation avec l'Inria sur Nancy (54000 France).
- 4) #####

#####. Travail en cours.



Pour diverses raisons les solutions alternatives 1) et 2) ne sont donc pas retenus. La CAIAC, elle, fait déjà partie de l'algorithme AgroNum et permet effectivement un criblage plus graduel – plus collectif en sorte, tenant compte de l'erreur d'analyse a priori introduite par l'incertitude





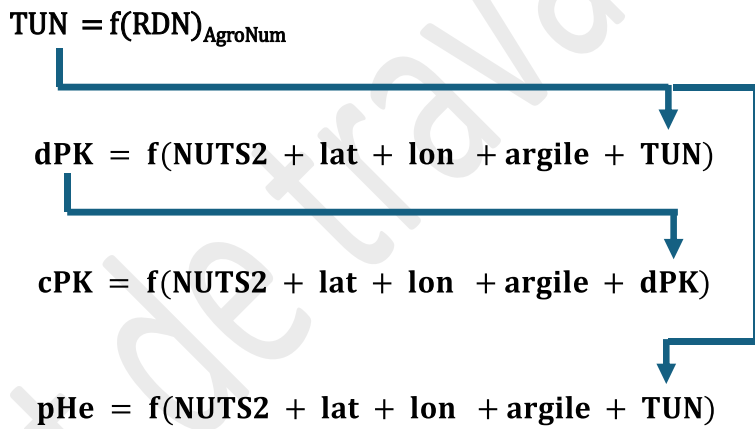
entourant de tels iSQ imparfaits. La quatrième option #####

#####. Travail en cours.

Le cas échéant, ces itec sont intégrés à la base de données et affecteront la calibration d'AgroNum, le positionnement de la courbe de réponse ainsi que les *plans de fertilisation* et le conseil agricole post-récolte (EP25206011.6 – non publié à data d'aujourd'hui). Cette ajustement socio-économique récompense cette technicité ayant permit d'intensifier la durabilité en réduisant les écarts de rendements (Schils et al. 2018).

Préparation des plan de fertilisation AgroNum™

Ces courbes de réponse à l'azote sont couplées à des fonctions (f) régionalisées (NUTS2) pour le calcul des doses d'engrais P & K (dPK, kg_{PK}/ha), des seuils critique en P & K (cPK, mg/kg_{sol}) critiques, ainsi que les éventuels pH telluriques (pHe). Ces fonctions sont obtenues avec le même type d'IA (Prokhorenkova et al. 2019) assurant ainsi que l'ensemble du plan de fertilisation NPKH conduise lui aussi à la conservation de la MOS.



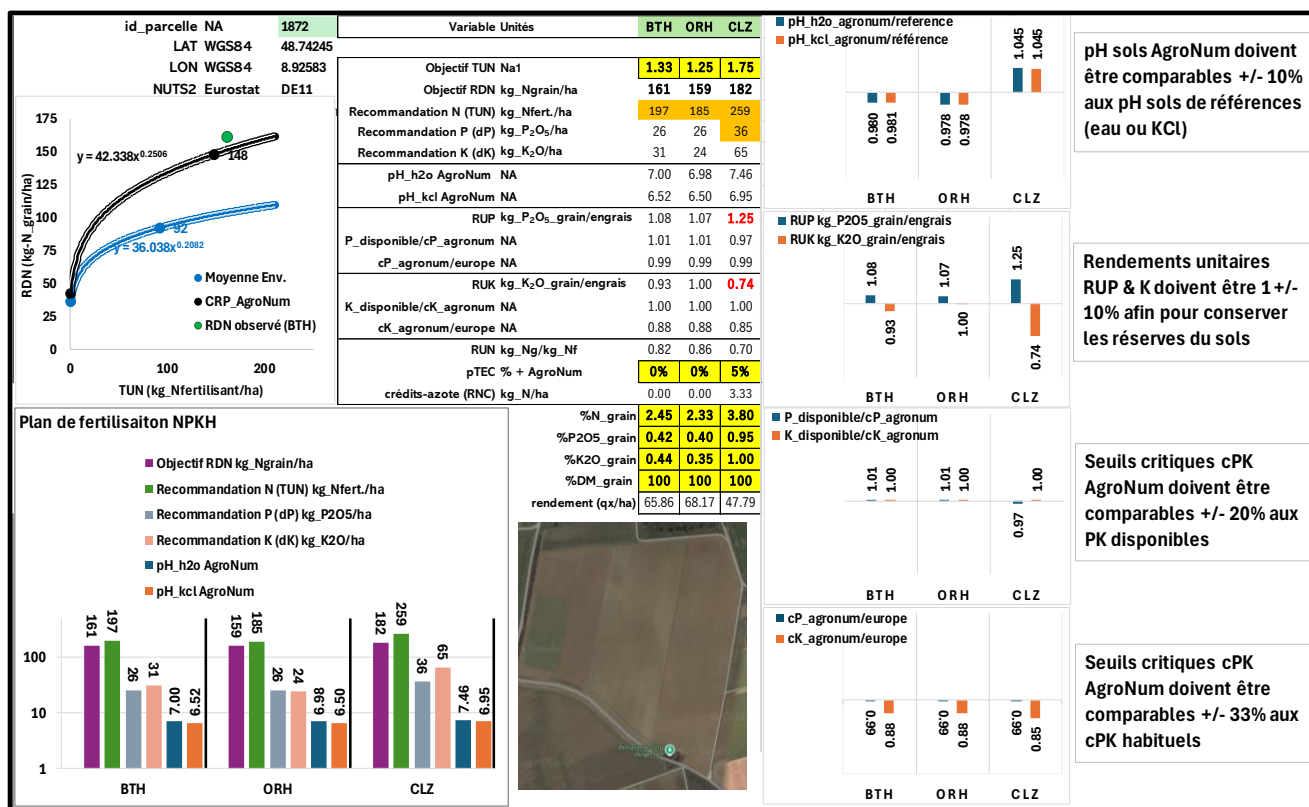
L'objectif de rendement RDN est fixé par l'agriculteur par rapport au *point de bascule* Na1 lorsque RDN ≡ TUN (ici, 148 ; page suivante). Connaissant l'objectif de rendement RDN et son taux de fertilisation-N TUN correspondant établit les doses d'engrais dP & dK, les teneurs critiques cP & cK ainsi que les pH telluriques éventuellement et durablement atteints (pHe) à titre de plan de fertilisation NPKH.

Ces recommandations NPKH sont contraintes de manière à être commensurables avec celles des *plans prévisionnels de fertilisation* (PPF) actuellement préconisés. À la page suivante, un plan de fertilisation AgroNum™ réalisée sans échantillonnage des sols. Les cellules **surlignées en jaune** sont dynamiques et font l'objet de conseil agronomique a posteriori, par exemple selon l'approche en trois temp de Nutri-Check_EU (<https://platform.nutri-checknet.eu/>).

Les grandes cultures à graines non-*Fabaceae* sont concernées. Trois sont affichées ici à titre d'exemple ; BHT blé tendre d'hiver, ORH orge d'hiver & CLZ colza. L'utilisateur ne communique *que* les coordonnées LAT/LON les plus au centre de la parcelle, voire l'objectif de rendement protéique RDN *ou* le taux de fertilisation-N (TUN) souhaité.

Une courbe à titre de **moyenne environnementale** est générée pour comparaison (*baseline* – EP4101280) et le calcul de crédits azote remboursables (RNC - EP4491001) fonctions d'un éventuel progrès technique pTEC. Les doses PK **surlignées en beige** sont impératives puisque les disponibilités P & K sont inférieures au seuils cPK AgroNum™. Enfin, les contraintes sont explicitées afin de rendre ces plans de fertilisation plus tenables aux yeux du conseil agricole.



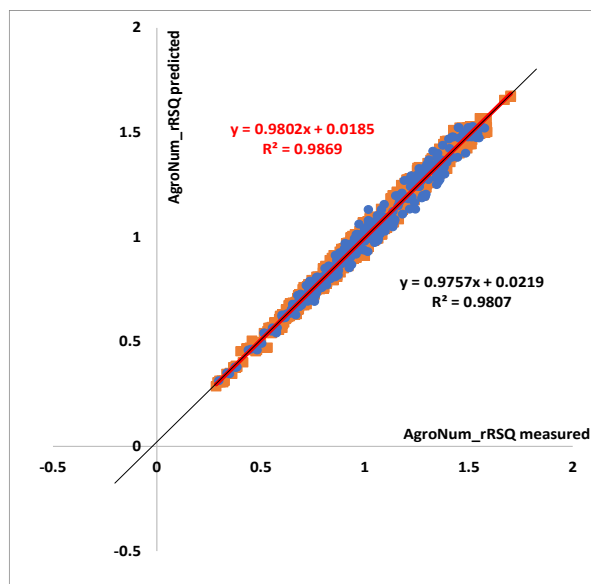


Ces plans (prévisionnels) de fertilisations NPKH AgroNum™ contournent la plupart des problèmes liés à l'utilisation des PPF conventionnels, à savoir une incohérence interrégionale et internationale des grilles de recommandations N, P & K, des seuils tellurique critiques P & K (eg. Jordan-Meille et al. 2012, 2023 ; Schut et al. 2020). La notion de *pH tellurique éventuellement durable* (pHe) pourrait aussi remplacer celle de pH optimal. De même pour le concept de *crédits-azote remboursables* (RNC ; kg-N/ha/année ; [EP4491001](#)) voués à remplacer celui de crédits-carbone échangeable actuellement proposée en agriculture bas-carbone. À suivre.

Validation numérique et agronomique

Rappel. AgroNum™ est une implémentation dématérialisée de ce que l'on sait de la dynamique de la MOS et plus particulièrement de l'impact de l'efficacité de l'azote fertilisant sur l'attaque microbienne de la MOS et/ou l'humification des résidus de culture restitués. Sa validation doit donc comporter une validation numérique des algorithmes de (cat)boosting et d'intelligence artificielles collective utilisés. Elle doit aussi justifier cette réduction apparemment simpliste de la conservation de la MOS à la dynamique de l'azote plutôt que celles de phosphore, soufre ou potassium. AgroNum doit aussi s'inscrire dans une logique de réduction des écarts de rendement s (*yield gaps*, angl.) à titre d'alternative à l'agriculture bas-carbone.

Précision numérique de catboost : Rappel. L'algorithme AgroNum est paramétré à l'aide des rendements unitaire ajustés RUN des itinéraires techniques retenus comme étant durables au sens entendu. Pour chacune des parcelles validation de tels RUN sont rétro-calculées de RSQ de manière à obtenir une série de besoins unitaires $a_{AgroNum}$ à différents taux de fertilisation azotée TUN, AgroNum™ et de là la courbe de réponse à l'azote. La précision des ces prédictions de RSQ est très élevée, soit de l'ordre d'au moins 95%. Cette validation statistique est réalisée à l'aide d'une série de partitions selon la fonction R° *createDataPartition* (package *caret* version 6.0-94) créant des pools de données d'entraînement (85 %) et de test (15 %) attribués via les fonctions *catboost.load_pool* et *catboost.train*. Les pools test & train sont par la suite via *catboost.predict* et superposés à titre de validation numérique (**Figure 7** ; page suivante).



La précision algorithmique d'AgroNum™ est caractéristique des algorithmes de boosting, tel que catboosting (<https://catboost.ai/>) capables de prendre en compte des centaines, voire des milliers de classificateurs faibles, sans aucune limitation d'orthogonalité, de degrés de liberté, d'autocorrélation et d'autres exigences des modèles algébriques généraux. Ici, 15 % des quelques 3 300 itec produisent des RUN au sens entendu sont précisés via l'algorithme avec les 85 % restants. Chaque combinaison contient près de 1 200 classificateurs faibles mais aussi les données agronomiques de base sur le rendement azoté RDN des grains et les taux d'application des engrais azotés TUN.

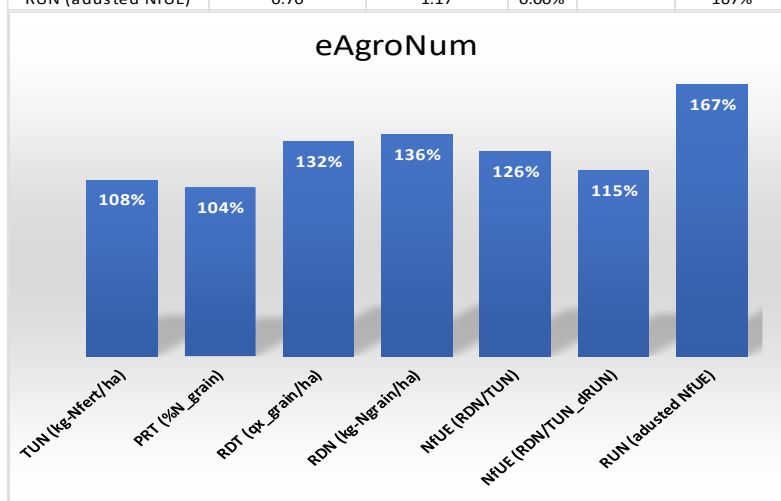
Rôle de la IA collective (CAIAC) réitérative : Le rôle de l'intelligence artificielle collective (CAIAC) est primordial lors du développement d'AgroNum™. Cela permet d'obtenir une solution adéquate en terme de dynamique et conservation de la MOS selon l'efficacité ajustée de la fertilisation azotée. Cette CAIAC est particulièrement adaptée lors la règle heuristique – ici l'exclusion des itinéraires techniques aux CAU de l'azote fertilisant soit trop faibles, soit trop élevés (supra) est parfaitement défendable mais a priori difficilement chiffrable précisément au niveau de la parcelle. De nombreuses études en divers domaines d'application existent ; (Bovy et al 2025, Delage et al 2021, Eysenbach et al 2018, Oliehoek et al 2013, Sim et al 2008, Shani et al. 2007, Tarbouriech et al. 2020a/b, etc.). Cette approche numérique qu'est la CAIAC fait présentement l'objet d'un projet Inria/Polyor ayant pour objectif d'adapter cette technologie au conseil agricole tel que préconisé par Polyor SAS. Travail en cours.

Stœchiométrie CNPS de la MOS : La MOS est particulièrement riche en azote, beaucoup moins en phosphore, soufre et potassium. Des ratios rCN, rCP et rCS de l'ordre d'environ 10, 100 et 100 respectivement sont attendus (Apostel et al. 2013, Kirkby et al. 2016a/b, Liu et al. 2023a/b, Richardson et al. 2014, Tipping et al. 2016, Chantigny et al. 2023). Le potassium, lui, tant qu'*osmolyte* (angl.) minéral n'est pas limitant pour l'humification des résidus de culture au sols. Cet enrichissement relatif en azote de la MOS est dû soit à la décarboxylation, la transamination, l'*amination réductive* (sic) voire la simple hydrolyse des aminés des résidus de culture permettant de dégager un atome de carbone sous forme de CO₂ tout en laissant à la MOS l'atome d'azote correspondant ainsi « protégé » en sorte, et cela contrairement aux atomes de phosphore d'acide phytique (Lim et al. 2007, Doolette et al. 2010) et de sulfate d'esters organique (Blum et al. 2013) moins protégées et dont la minéralisation n'implique pas un tel enrichissement en P & S de la MOS. Cette stœchiométrie de la MOS implique que sa conservation est surtout voire exclusivement limité par l'apport supplémentaire d'azote, notamment et surtout ici par voie d'enrichissement relatif en azote des résidus de culture avantageusement prise en compte lors du calcul de *crédits azote remboursables* (RNC) au sens d'EP4491001.

eAgroNum et écarts de rendement (Schils et al. 2018) : *L'agriculture durable et bas carbone préconise souvent la réduction du rendement des céréales pour diminuer les taux de fertilisation à base d'azote, censés être responsables des émissions de GES. Cette extensification peut entraîner des « fuites », car ces rendements manquants devront être produits ailleurs, souvent sur des terres plus marginales susceptibles de dégrader les sols. Or, les écarts de rendement à travers l'Europe indiquent que les rendements devraient augmenter, et non diminuer, en réponse aux impératifs européens et mondiaux de sécurité alimentaire.*

Selon Schils et al. 2018 en Europe l'écart moyen annuel combiné de rendement [des céréales] pour le blé, l'orge, le maïs était de 239 Mt, soit 42 % du potentiel de rendement ». De plus, cela nécessiterait une augmentation substantielle de la mobilisation de l'azote par les cultures de 4,8 Mt. Toujours selon Schils et al. 2018, les écarts moyens d'absorption d'N, pour atteindre 80% du potentiel de rendement sont de 87, 77 et 43 kg-N/ha pour le blé, l'orge et le maïs, respectivement. Ils concluent qu'il faut insister sur l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de N pour minimiser le besoin de N entrées supplémentaires.

variable	rASQ env. means	rRSQ AgroNum	tTest	eAgroNum
TUN (kg-Nfert/ha)	128	139	0.00%	108%
PRT (%N_grain)	2.12	2.20	0.00%	104%
RDT (qx_grain/ha)	49.77	65.72	0.00%	132%
RDN (kg-Ngrain/ha)	99	135	0.00%	136%
NfUE (RDN/TUN)	0.77	0.97	0.00%	126%
NfUE (RDN/TUN_dRUN)	0.80	0.92	0.00%	115%
RUN (adjusted NfUE)	0.70	1.17	0.00%	167%



Globalement, les rendements ciblés d'AgroNum [RDT] pour 11 cultures de champ non céréales (principalement des céréales, mais aussi du colza, du tournesol et du maïs) sont nettement supérieurs aux moyens environnementaux conventionnels. Encore plus en termes de rendement azoté des grains [RDN]. Cela, à des taux de fertilisation azotée TUN comparables (+8%) ce traduisant par une nette augmentation de l'efficacité de l'engrais N, NfUE et RUN. AgroNum™ réduit donc les écarts de rendements (*yield gaps*, angl.) céréaliers à travers l'Europe.

pTEC et crédits azote remboursables (RNC) via Roth-C® : Le calcul des RNC selon EP4491001 s'appuie sur trois (3) réalités agronomiques. La première stipule le véritable effet d'un traitement TRT par rapport à son témoin trt est appréciable que s'il est ajusté pour l'efficacité décroissant de l'azote fertilisant (RUN) et un certain indice de la productivité inhérente de la parcelle, iSQ. Cette ajustement de RUN selon iSQ donne RSQ au sens d'EP4252516. Formellement, l'efficacité de TRT est déterminé par rapport à trt en termes de rendement unitaire de l'azote RUN (kg-N_{grain}/kg-N_{fertilisant}) ajusté par iSQ & d_{RUN} tel que proposé en EP4491001 ;

$$eTRT_{RUN} = \left[\frac{RUN_{TRT}}{RUN_{trt}} \right]_{RSQ}$$

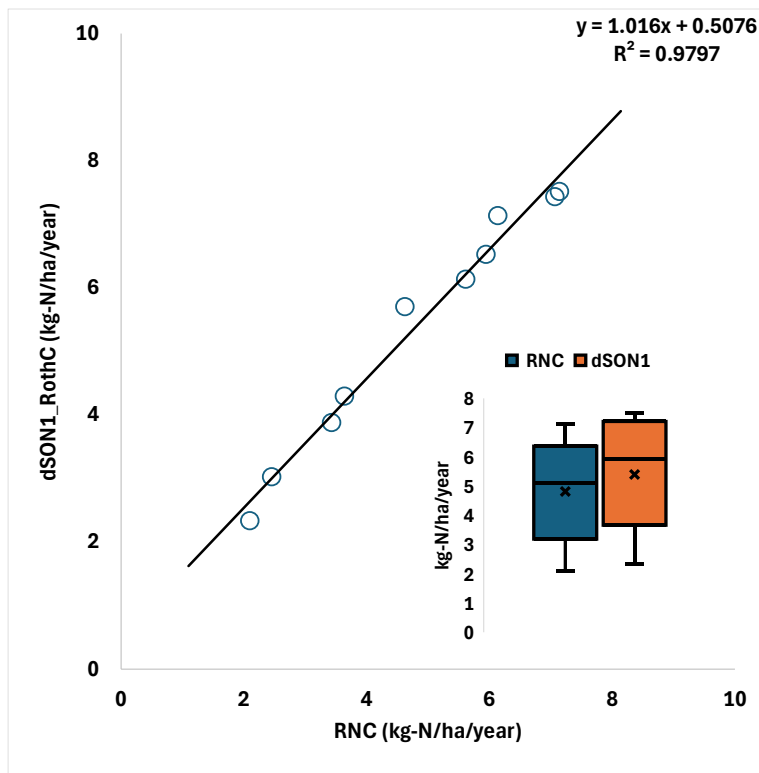
La deuxième exige que seul le progrès technique augmentant les rendements azotés RDN au-delà de la courbe de réponse durable AgroNum™ de référence soit considéré lors de l'octroi de crédits azote remboursables. Faute de quoi, l'attribution de tel crédits ne sera pas nécessairement méritoire ou équitable. Formellement, lorsque pTEC_{TRT} & pTEC_{trt} proviennent de l'ajustement par rapport à CRP selon TUN_{TRT} & TUN_{trt} fonction en puissance d'a1 & b1 décrivant ces courbes de réponses proposées en EP4491001 ;

$$pTEC_{TRT} = [RDN_{TRT}]_{CRP_N} | > 1 ; CRP_{N_{TRT}} = a1 \times TUN_{TRT}^{b1}$$

La troisième rappelle que le susdit effet traitement eTRT doit être relativement plus grand que le susdit progrès technique pTEC durable attribuable à ce traitement TRT faute de quoi il n'y aura pas suffisamment d'azote supplémentaire mobilisé pour alimenter les grains et les résidus de culture ainsi dépourvu au dépend de leur humification. Formellement, augmentant du coup

les retours au sol d'azote UN_RCN_TRT (kg-N_{résidus}/ha) attribuables au traitement TRT à l'essai sur la parcelle, par exemple une quelconque biofertilisation (cf. EP4491001) ;

$$UN_{RCN_{TRT}} = [1 - eTEC_{RDN}] \times UN_{RDN_{TRT}} \mid eTEC_{RDN} = \left[\frac{pTEC_{TRT}}{eTRT_{RUN}} \right]$$



Ces trois (3) exigences font maintenant partie intégrante de la solution technique AgroNum™. Les unités d'azote (UN) laissées aux résidus de culture (RCN) attribuable au traitement TRT à titre crédits azote remboursable (RNC) sont une alternative aux crédits carbone actuellement proposés en agriculture bas-carbone (*carbon farming*, angl.). A titre de progrès technique ces RNC ont été modélisés avec une certaine précision par le modèle Roth-C® (*Roth-C*), mais cela que pour le Royaume Unis et l'Irlande, là où il a été développer. Voir ici la figure à gauche). Notons que le calcul des RNC via AgroNum™ permet de contourner cette limitation géographique.

Références citées dans le texte

- Apostel et al. 2013. Biochemical pathways of amino acids in soil: Assessment by position-specific labeling and ¹³C-PLFA analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.005>
- AUREA Agrosiences. (2025). Analyse de terre physico chimique. www.aurea.eu
- Bovy et al. 2025. Multi-Environment POMDPs: Discrete Model Uncertainty Under Partial Observability. <http://arxiv.org/abs/2510.23744>
- Breiman 2001. Statistical Modeling: The Two Cultures. In *Source: Statistical Science* (Vol. 16, Issue 3).
- Brentrup et Palliere, C. (2010). Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator. www.fertilizerseurope.com
- Chantigny et al. 2025. Investigating the nature of soil carbohydrates and amino compounds with liquid chromatography. *Soil Science Society of America Journal*, 89(1). <https://doi.org/10.1002/saj2.70018>
- Churka Blum et al. 2013. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma*, 200–201, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.003>
- Delage et al. 2021. HSVI pour zs-POSG usant de propriétés de convexité, concavité, et Lipschitz-continuité. <https://inria.hal.science/hal-03523951v1>
- Doolette, A. L., Smernik, R. J., & Dougherty, W. J. (2010). Rapid decomposition of phytate applied to a calcareous soil demonstrated by a solution ³¹P NMR study. *European Journal of Soil Science*, 61(4), 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01259.x>
- EUNEP 2014. Nitrogen Use Efficiency (NUE) an indicator for the utilization of nitrogen in food systems. www.eunep.com
- EUNEP 2016. Guidance Document for assessing NUE at farm level. EU Nitrogen Expert Panel / www.eunep.com

- Eysenbach et al. 2018. Diversity is All You Need: Learning Skills without a Reward Function. <http://arxiv.org/abs/1802.06070>
- Kirkby et al. 2016a. Accurate measurement of resistant soil organic matter and its stoichiometry. *European Journal of Soil Science*, 67(5), 695–705. <https://doi.org/10.1111/ejss.12378>
- Kirkby et al. 2016b. Inorganic nutrients increase humification efficiency and C-sequestration in an annually cropped soil. *PLoS ONE*, 11(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153698>
- Lim et al. 2007. Distribution and diversity of phytate-mineralizing bacteria. *ISME Journal*, 1(4), 321–330. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.40>
- Liu et al. 2023a. Crop residue return sustains global soil ecological stoichiometry balance. *Global Change Biology*, 29(8), 2203–2226 / <https://doi.org/10.1111/gcb.16584>
- Liu et al. 2023b. Meta-analysis on the effects of types and levels of N, P, and K fertilization on organic carbon in cropland soils. *Geoderma* (Vol. 437) / <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116580>
- Oliehoek et al. 2013. Incremental Clustering and Expansion for Faster Optimal Planning in Decentralized POMDPs. In *Journal of Artificial Intelligence Research* (Vol. 46).
- Perrin et al. (2023). Microbioterre : référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des apports de matières organiques au champ. *Innovations Agronomiques* 88 : 15-30.
- Prokhorenkova et al. 2019. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. <http://arxiv.org/abs/1706.09516>
- Richardson et al. 2014. The inorganic nutrient cost of building soil carbon. *Carbon Management*, 5(3), 265–268. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.923226>
- Schils et al. 2018. Cereal yield gaps across Europe. *European Journal of Agronomy*, 101, 109–120 / <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>
- Sim et al. 2008. Symbolic Heuristic Search Value Iteration for Factored POMDPs. www.aaai.org
- Shani et al. 2007. Forward search value iteration for POMDPs. *IJCAI 2007* : 2619-2624
- Stoumann et al. 2011. Benefits of nitrogen for food, fiber and industrial production. In *The European Nitrogen Assessment*, ed. Sutton et al., Cambridge University Press
- Tarbouriech et al. 2020a. Improved Sample Complexity for Incremental Autonomous Exploration in MDPs. 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020), Vancouver, Canada
- Tarbouriech et al. 2020b. Active Model Estimation in Markov Decision Processes. <http://arxiv.org/abs/2003.03297>
- Tipping et al. 2016. The C:N:P:S stoichiometry of soil organic matter. *Biogeochemistry*, 130(1–2), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0247-z>
- Tscheiller et al. 2025. Indicateurs de fonctionnement biologique des sols agricoles / Fiches pratiques Recueil de fiches issues des travaux du RMT Bouclage.
- van Grinsven et al. 2022. Establishing long-term nitrogen response of global cereals to assess sustainable fertilizer rates. *Nature Food*, 3(2), 122–132. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00447-x>