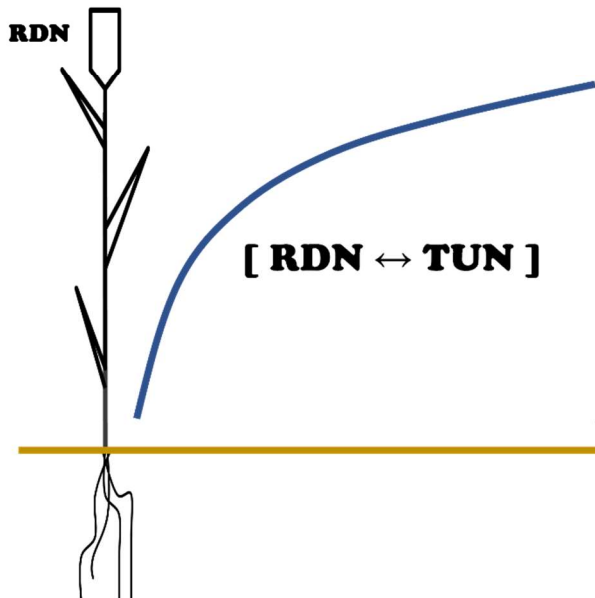


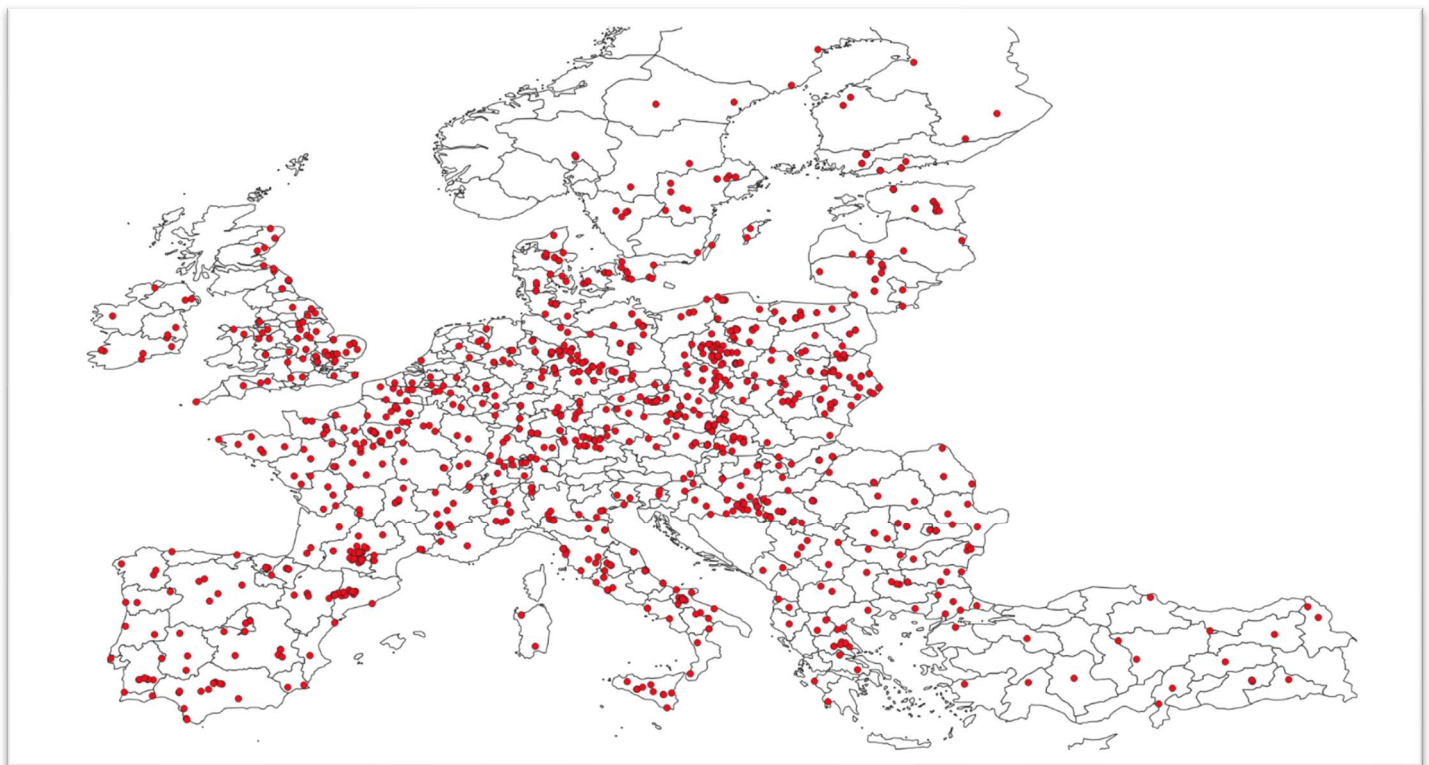
AgroNum™ : une parcelle → une courbe de réponse-N_{fertilisant}



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 ;



Argumentaire & Positionnement d'AgroNum™



A 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 de type « *gradient boosting* » beaucoup plus prédictifs que les habituelles méthodes algébriques (eg. régressions linéaires, analyses de variances, etc.). 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, voire le taux de fertilisation azotée qu'il/elle souhaite valoriser.

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 (kg-N_{grain}/kg-N_{fertilisant})** ni trop faibles, ni trop élevés.

Le présent document décrit l'argumentaire et le positionnement d'AgroNum™ à titre d'outil de fertilisation raisonnée en agriculture durable. Il sera plus question de conservation des sols que de stockage de carbone, alias LBC, « carbon farming », etc. AgroNum™ cherche aussi à assurer une durabilité au sens plus classique intégrant des aspects tant socio-économiques tels que les écarts de rendements (*yield gaps*, angl.), qu'environnementaux.

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.**

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 rendements 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, etc. etc.

AgroNum™ a été essayée virtuellement en Europe en compilant **20764 itinéraires techniques géoréférencés**. AgroNum™ amènent des augmentations des rendements ≈40% en accord avec les écarts de rendements constatés par Schils et al. 2018 en production céréalière eu. (→ www.polyor.fr / Validation / Déplafonnement des rendements)

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 ni trop faible, ni trop élevés. (→ www.polyor.fr / Validation / Conservation)

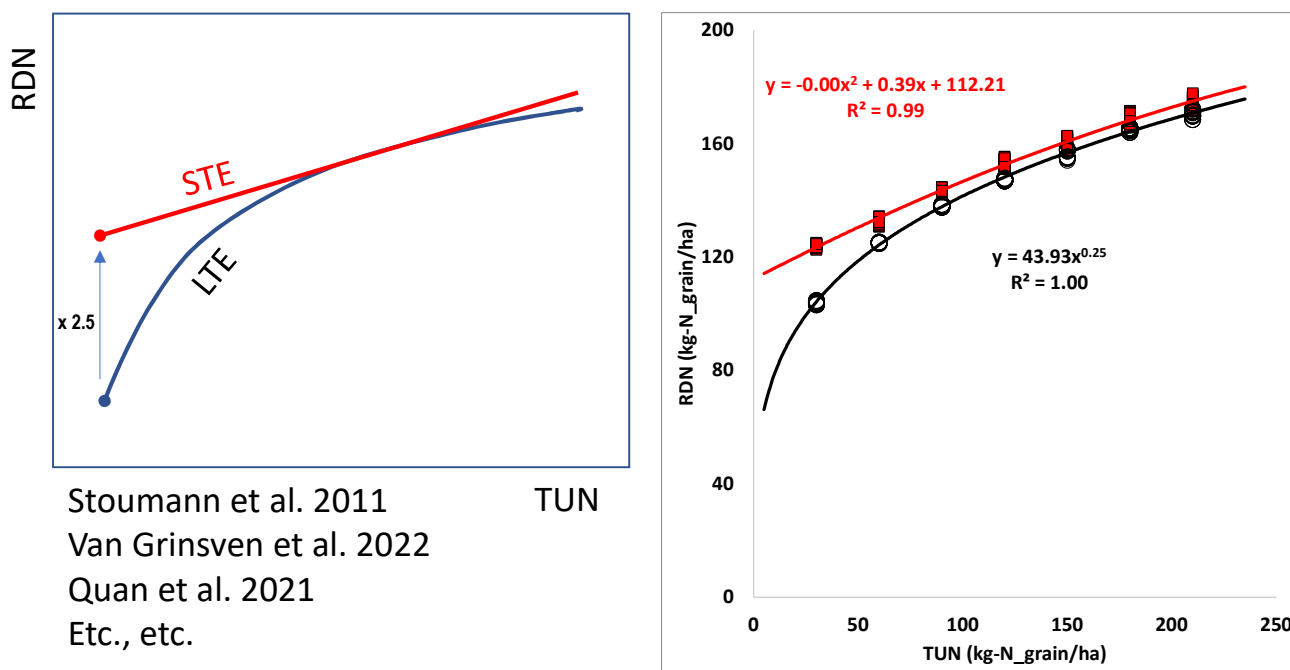
La précision du fonctionnement de l'algorithme AgroNum™ a, elle, été validée à l'aide d'un sous-ensemble de 15% des parcelles comprises dans le jeu de données comprenant que les itinéraires les plus durables au sens entendu (Figure 10). Cette approche stochastique, dite parfois « Monté Carlo », démontrent clairement la puissance de cette forme « d'intelligence artificielle » appliquée à l'agriculture durable. (→ www.polyor.fr / Validation / Précision)

Enfin, cette approche AgroNum™ de Polyor SAS est nouvelle, voire en profonde rupture avec les l'état de la technique en agriculture de précision et fertilisation raisonnée. Il est donc opportun pour Polyor SAS de prendre position auprès de l'Inpi et l'Oeb (www.polyor.fr). Ces nouveaux brevets vont maintenant compléter le portefeuille de PI Polyor déjà appréciable dans le domaine de *fertilisation azotobactérienne*, AZB™

➤ **Les courbes de réponse de rendements grains azotés, RDN, durables, sont plus abrutées et en puissance, que quadratiques ou linéaires ;**

A long terme, i.e. durablement, les courbes de réponse des rendements azotés, RDN, à l'azote fertilisant, TUN, sont plus en puissance que quadratiques (Figure 1). Cela est dû à l'épuisement des reliquats d'azotes normalement disponibles à court terme. Or, ces reliquats rémanents n'ont pas raisons d'être en fertilisation raisonnée et ne peuvent donc contribuer à fixer les objectifs de rendements durables.

Figure 1 : La durabilité se réalise sur le long terme. Des essais « long terme » (*long-term experiments*, LTE) démontrent que les rendements azotés RDN sans fertilisation azotée, aN1, sont nettement plus faibles (courbe basse) sur de telles LTE que sur essais avec des apports passés d'engrais-N plus récents (*short-term experiments*, STE). Les courbes de réponses AgroNum™ (figure à droite) illustrent parfaitement ce phénomène, soit à titre d'exemple une des 1 300 parcelles essayées (50.47300 N 3.20890 E).



Les ratios entre les valeurs aN1 STE/LTE publiées sont généralement d'environ 2.50, soit exactement du même ordre que les ratios observés entre les valeurs aN1 dérivées directement de RDN (courbe rouge, Figure 1) et celles rétro-calculées de RUN médians ni trop faibles, ni trop élevés (courbe noire) sélectionnés par l'algorithme AgroNum™ (infra). Notons ici à titre d'exemple que $aN1/aN1 = 112.21/43.93 = 2.55$. CQFD.

Tableau 1 : Les rendements azotés, RDN (kg-N_grain/ha), sans engrais azotés (aN1) provenant de véritables essais à long terme (LTE ; *long-term experiments*) par rapport aux aN1 estimées par AgroNum™ en ces mêmes lieux (latitude, longitude). La correspondance (Figure 2) n'est pas parfaite, mais les rotations véritablement sans apports d'azote, y compris l'azote rémanent des légumineuses et reliquats sont elles aussi le plus souvent imparfaites. Mais bon.

aN1_AgroNum	aN1_LTE	Référence LTE	latitude	longitude
43.11	45.00	Johnston et al. 2018	51.81056	-0.36927
28.95	30.00	Kolmanic et al. 2022	46.50303	15.63330
41.42	41.00	Kubat et al. 2003	50.08882	14.29138
36.26	42.00	Korschens et al. 2012	46.74180	17.23990
43.00	46.00	Shejbalova et al. 2014	49.55442	15.35057
42.80	43.70	Shejbalova et al. 2014	50.07404	14.17245
28.97	35.00	Lopez-Bellido et al. 2001	37.75978	-4.52902
29.33	31.00	Anastasi et al. 2019	37.38228	15.02198
42.27	45.00	Korschens et al. 2012	50.80129	10.22457
36.50	41.20	Pepo et al. 2016	47.55693	21.44690
29.00	33.00	Plaza-Bonilla et al. 2021	41.81180	1.16597
30.00	31.00	Amosse et al. 2013	44.61535	5.43880
30.00	31.00	Amosse et al. 2013	44.64879	4.88194
27.00	25.00	Poma et al. 2004	37.63686	13.76517
36.00	34.00	Jolankai et al. 2006	46.73393	17.23108
29.30	35.00	Anastasi et al. 2019	37.38226	15.02198
34.00	38.00	Dumbrava et al. 2016	44.50001	26.25716
41.50	40.70	Cerny_et_al._2010	49.55635	14.97752
31.00	31.00	Fiorentini et al. 2021	43.54308	13.36529
47.10	52.00	Nevens et al. 2018 (BE23)	50.98512	3.81723
43.11	43.80	Van Grinsven et al. 2022	51.81056	-0.36927

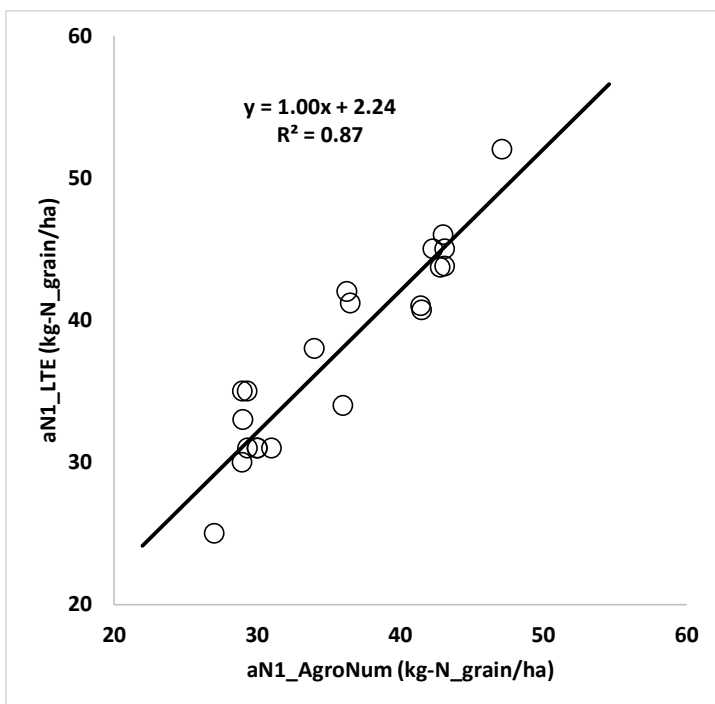


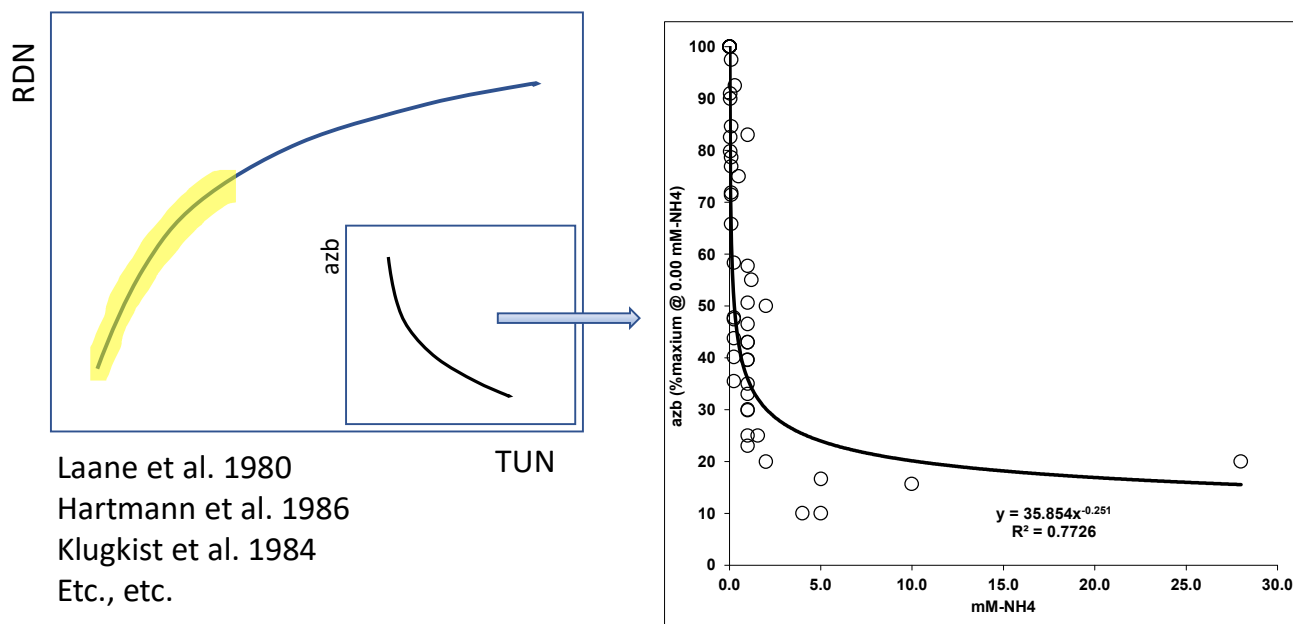
Figure 2 : Représentation graphique des données au Tableau 1 des RDN aN1 (sans azote fertilisant) provenant de séries expérimentations à long terme (LTE) par rapport aux valeurs d'aN1 générées par l'algorithme AgroNum™. Selon Polyor SAS (www.polyor.fr), aN1 est surtout tributaire de l'activité diazotrophe non-symbiotiques du sol, dite *azotobactérienne* (azb), notamment en présence de résidus de culture pailleux laissés au sol et enfouis dans la couche arable.

Il est ainsi possible de reproduire cette corrélation aN1_LTE :: aN1_AgroNum. Les valeurs d'aN1 tributaires de l'activité azotobactérienne indigène du sol, azb, est donc prédite assez bien par AgroNum. Cette valeur d'aN1 est caractéristique du lieu où se trouve la parcelle agricole et assez bien corrélée avec la productivité intrinsèque du sol, iSQ (infra, Toth et al. 2013).

➤ **C'est la diazotrophie (« fixation » du diazote) non-symbiotique, azb, qui, à faible taux de fertilisation azotée, TUN, dicte la durabilité des rendements ;**

A faibles taux de fertilisation-N, cette réponse à l'azote est franche et correspond à la rapide dégradation de la *diazotrophie* « indigène », azb, des sols. Il s'avère que cette dégradation d'azb est, elle aussi, en puissance par rapport à TUN (Figure 3), pas tellement du fait des reliquats d'N-minéral, mais plutôt de la minéralisation de l'azote des résidus de cultures. À environ 1 mM N-NH₄ minéralisé dans la *résidusphère*, l'atrophie d'azb est quasi complète.

Figure 3 : La dégradation d'azb – i.e. l'activité azotobactérienne *indigène* du sol, selon l'accumulation de l'azote ammoniacal réactif exprimée en milli-molaires (mM) dans la *résidusphère* et/ou la solution du sol est essentiellement l'inverse de la courbe de réponse à l'azote de RDN AgroNum™ (Figures 1 & 11). Cette dégradation d'azb est bien connue (Laane et al. 1980, Hartmann et al. 1986, Klugkist et al. 1984, etc. ; figure de droite). Notons aussi que 1 mM N-NH₄ → ≈ 14 kg N-NH₄/ha.

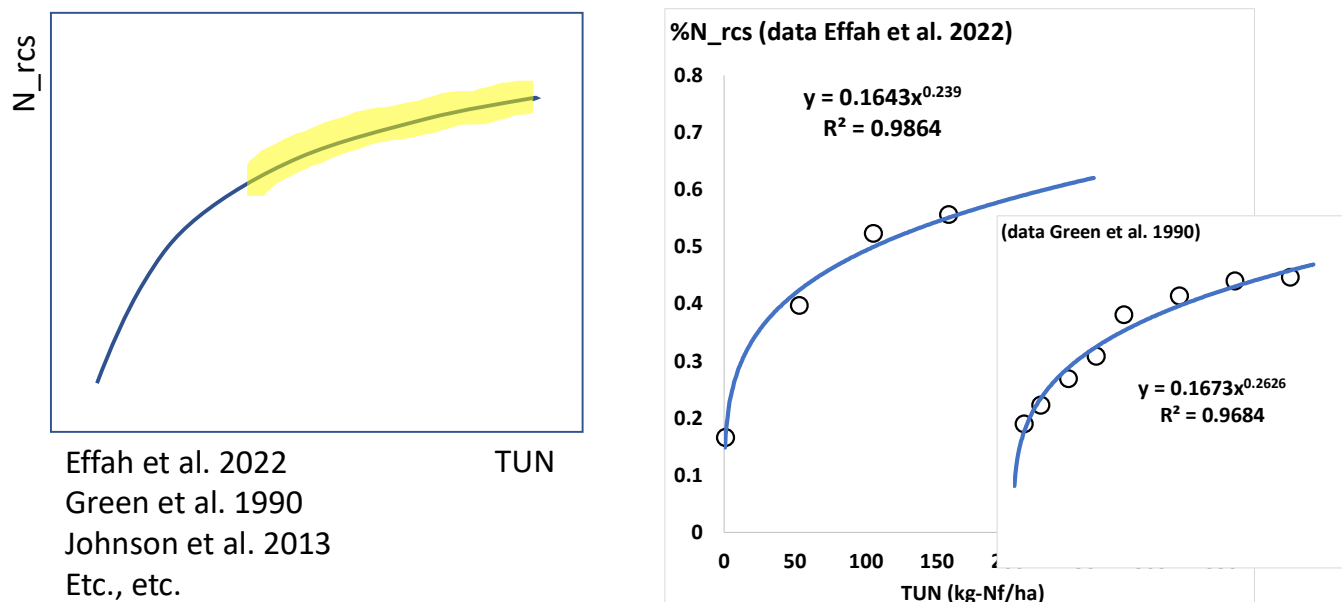


Cette « fixation » non-symbiotique du diazote a longtemps été sous-estimée au profit d'une présumée déposition d'azote réduit directement de l'atmosphère par les précipitations. Or, Polyor SAS maintient qu'azb est bien présente à faibles TUN, mais s'atténue rapidement lors de la minéralisation de l'azote dans la résidusphère (Figure 3).

➤ **A plus hauts de fertilisation azotée, c'est l'enrichissement progressif en azote des résidus de culture qui assure leur humification ;**

A taux de fertilisation azotée, TUN, plus élevés et plus habituels, les résidus de culture plus abondants s'enrichissent progressivement en N. La base de connaissance révèle que cet enrichissement des résidus de culture est parfaitement décrit par la continuation d'une simple fonction en puissance d'ordre $b \approx 0.2500$ (Figure 4), soit quasi identique à celui observé pour la susdite atrophie d'azb selon l'augmentation du taux de fertilisation TUN (Figure 3).

Figure 4 : Bien que peu documenté en comparaison à l'azote mobilisé par les grains, une méta-analyse d'une vingtaine d'articles (Effah et al. 2022, Green et al. 1990, etc., etc.) révèle que la puissance du taux d'augmentation des teneurs, et retours (Figure 5), en N des résidus de cultures, N_{rsc}, de grandes cultures non-*Fabaceae* est de l'ordre de ≈ 0.2500 , soit parfaitement comparables à celui des objectifs de RDN AgroNum™ selon le taux de fertilisation-N, TUN (kg-N_{fert}/ha).



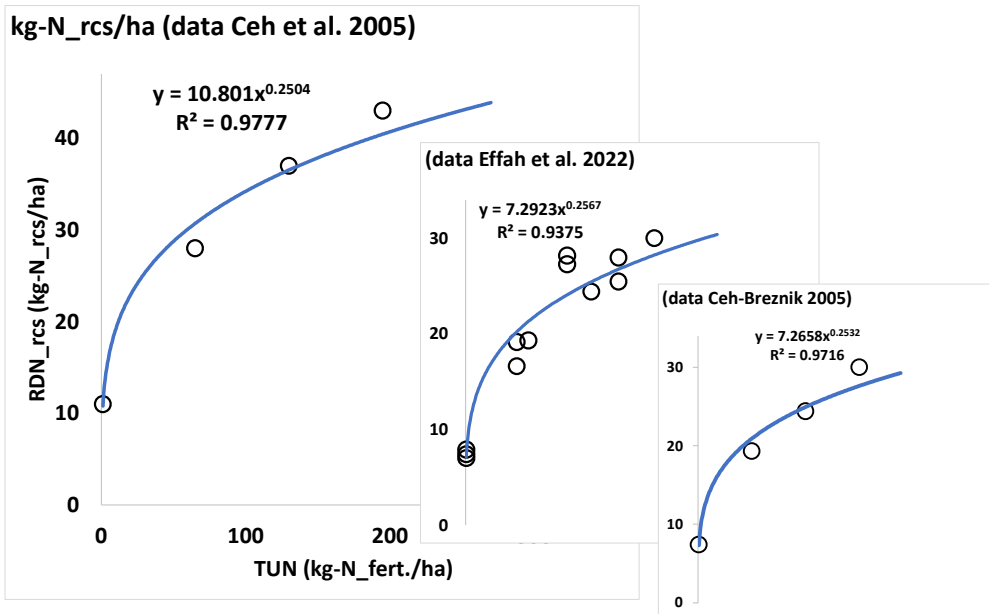


Figure 5 : On retrouve aussi en puissance un taux d'augmentation similaire de l'ordre ≈ 0.2500 pour les quantités d'azote retournés au sol post-récolte par les résidus de culture, kg-N_rcs/ha. Encore une fois, ce taux d'augmentation coïncide avec celui des objectifs RDN AgroNum™ (Figures 1 & 11) assurant ainsi une alimentation en N du processus d'humification des résidus de culture, humification facteur de conservation de la matière organique du sol.

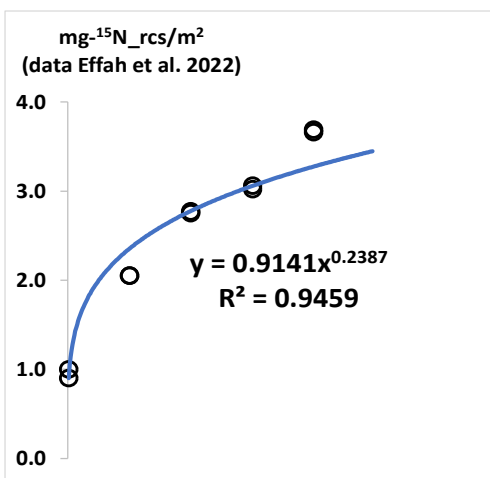
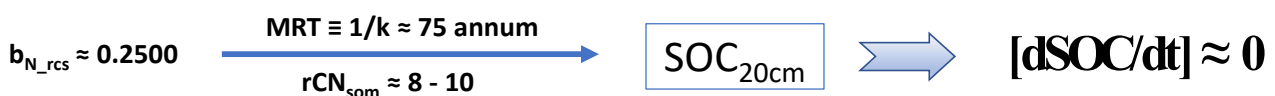


Figure 6 : Cette enrichissement progressif en N des résidus de culture est surtout le fait d'une relative moindre remobilisation vers les grains de l'azote dans la biomasse aérienne. Cet azote demeure donc dans les pailles post récolte. Cette accumulation de l'azote foliaire qui n'est pas (re)mobilisé post-floraison vers les grains est détectable à l'aide d' ^{15}N appliqué au feuillage et retrouvé dans les résidus de culture ; ici des data de Effah et al. 2022 à titre d'exemple.

➤ **Ne connaissant pas précisément les stocks de carbone tellurique, il s'agit surtout d'assurer la conservation de la matière organique du sol ;**

Étonnamment, ces taux d'augmentations de RDN_grain et RDN_rcs $b \approx 0.2500$ sont assez constants, voire généralisés, peu importe le type de grande culture non-*Fabaceae*, céréales, maïs, colza & tournesol. Polyor SAS maintient que ce taux d'accumulation de l'azote des résidus de culture dictera le niveau de rendement azoté durable.

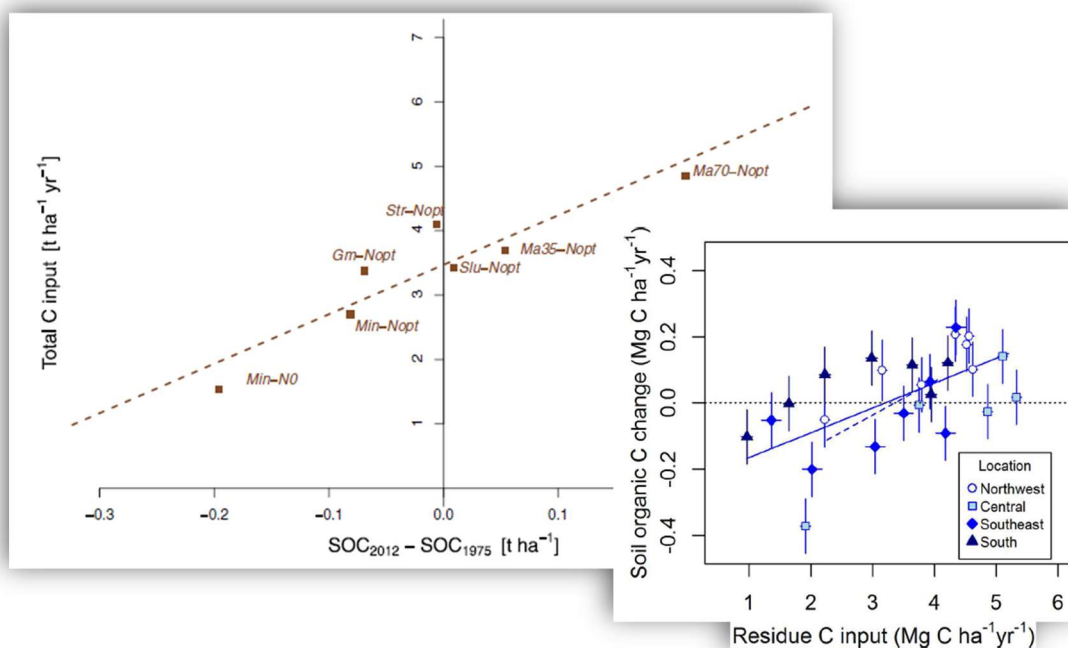
En effet, avec l'augmentation de TUN, de plus en plus de résidus de culture au sol, RCS, de plus en plus riches en N sont produits selon une fonction en puissance d'ordre $b \approx 0.2500$. Or, puisqu'en sols agricoles ces RCS et la matière organique ont nécessairement co-évolué, il est raisonnable de croire que l'atrophie d'azb dès $\approx 1 \text{ mM N-NH}_4$ est compensée par un enrichissement en N du même ordre. On peut facilement démontrer dès maintenant que des quantités de RCS à de tels %N_rcs progressivement de plus en plus importantes selon TUN permettent de maintenir à travers le temps, de conserver, les teneurs en C-organique de sols agricoles, i.e. ;



Connaissant ce coefficient en puissance $b \approx 0.2500$ qui dicte donc l'augmentation des teneurs & quantités d'azote véhiculés par les résidus de culture, on anticipe que les teneurs en carbone organique sur 20 cm de couche arable seront stables à travers le temps, si la persistance (*mean residence time - MRT*, angl.) de ce carbone apporté, enfoui et humifié est d'environ 75 années (Bolinder et al. 2020, Rabbi et al. 2013, Zhang et al. 2015, Anton et al. 2022, etc.), et le ratio C/N de la matière organique résultante d'environ 8 à 10.

Encore une fois, cette dynamique stable est facilement démontrable à l'aide de modèles dynamiques (Century, EPIC, etc.), parfois assez simples (ROTH-C, Wallach et al. 2021), voire par méta-analyses (Makowski et al. 2018) de données telle que celles à la Figure 7. Quitte à enfoncer des portes ouvertes, ces travaux d'illustration et de démonstration sont en cours chez Polyor SAS. **A ce stade, notons simplement qu'en conseil agronomique il faut établir des objectifs de rendements, RDN (kg-N_{grain}/ha) fonction en puissance de TUN (kg-N_{fert}/ha) dont le taux d'augmentation d'ordre $b \approx 0.2500$ correspond à celui de l'azote retourné aux sols par les résidus de culture. Ce faisant, en agriculture durable, les résidus de culture au sol contiendront ainsi toujours suffisamment d'azote pour être correctement humifiés en matière organique stable au ratio C/N ≈ 8 à 10 (Van Groenigen et al. 2018, etc.).**

Figure 7 : A titre d'exemples pour fins de méta-analyses (Maltas et al. 2018, Poffenbarter et al. 2017, etc., etc.), des quantités de carbone provenant de résidus de culture d'environ 3 à 4 tonnes/ha/année correspondant à un taux de fertilisation-N TUN ≈ 150 kg-N_{fert}/ha en cultures intensives de maïs ou de blé suffisent ici à maintenir (« 0.0 ») – conserver, des stocks de carbone tellurique. Il s'agit donc ici d'agriculture durable par *conservation* de la matière organique telle que préconisée par AgroNum™.



Par exemple à la figure 7, ces 3-4 tonnes de C/ha/année provenant des résidus de culture caractéristiques de grandes cultures plutôt intensives. Or, on peut aussi envisager des retours de carbone et des niveaux de carbone telluriques résultants plus faibles mais tout aussi stables & durables. Encore une fois, AgroNum™ préconise la conservation de la matière organique du sol en assurant une proportionnalité RDN_{grain}/RDN_{rcs} plus synonyme de conservation que de séquestration de carbone organique dans les sols, peu importe le niveau de rendement de la parcelle.

➤ **Il faut donc s'assurer que les RDN soient proportionnels & constants par rapport aux retours d'azote au sol par les résidus de culture :**

Durablement, les objectifs de rendements RDN_{grain} sont donc, *doivent* donc, être proportionnels aux « rendements », ou plutôt aux *retours*, azotés des résidus de culture, RDN_{rcs} .

- Mathématiquement, cela équivaut à poser $[RDN_{grain} = a1 \cdot TUN^{b1}] \equiv [RDN_{rcs} = a2 \cdot TUN^{b2}]$. On note que la proportion RDN_{rcs}/RDN_{grain} est une constante égale à $a2/a1$ si et seulement si $b1 = b2$, à savoir ; $[a2 \cdot TUN^{b2}/a1 \cdot TUN^{b1}] = [a2/a1 \cdot TUN^{(b2 - b1)}] = \frac{a2}{a1} \cdot 1$
- Graphiquement (Figure 8), rapporter $a2/a1$ révèle que lorsque $b2 = b1$, l'accroissement des retours & teneurs en N des résidus de culture, RDN_{rcs} , est proportionnel & constant à celui des rendements azotés, RDN_{grain} . C'est cette proportionnalité constante qui est ici synonyme de « durabilité ».
- Agronomiquement, le défi est donc d'**établir précisément pour chacune des parcelles agricoles une courbe de réponse des RDN_{grain} en puissance selon TUN, de manière à ce que $b1$ soit égale ou proche de 0.2500** sachant que $[RDN_{grain} = a1 \cdot TUN^{b1}]$.

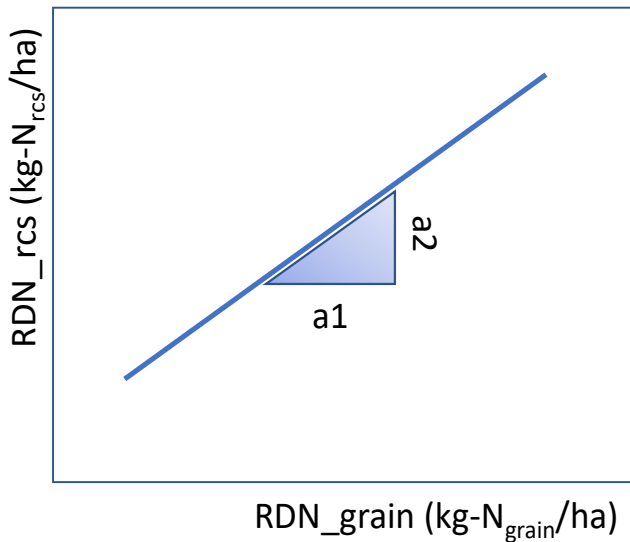


Figure 8 : Représentation graphique de la correspondance entre les rendements azotés grain, RDN_grain (kg-N_grain/ha) et les rendements, ou « retours », azotés résidus de culture, RDN_rcs (kg-N_rcs/ha) qu'assure AgroNum™ en précisant des objectifs de rendements azotés durables aux rendements unitaires azotés, RUN (kg-N_grain/kg-N_fertilisant) ni trop élevés, ni trop faibles. Le ratio a2/a1 est spécifiques à chaque parcelle.

Le plus souvent, a1 ≈ 33 et a2 ≈ 10 kg-N/hectare, ou encore ≈ 0.20 %N_rcs pour a2. Ce ratio a2/a1 est constant et spécifique à la parcelle, sachant que pour le moment seul a1 est connu, mais peu importe. Les valeurs de a2 pour la parcelle pourront être déduites au fil du temps à partir de données agriculteurs/parcellaires.

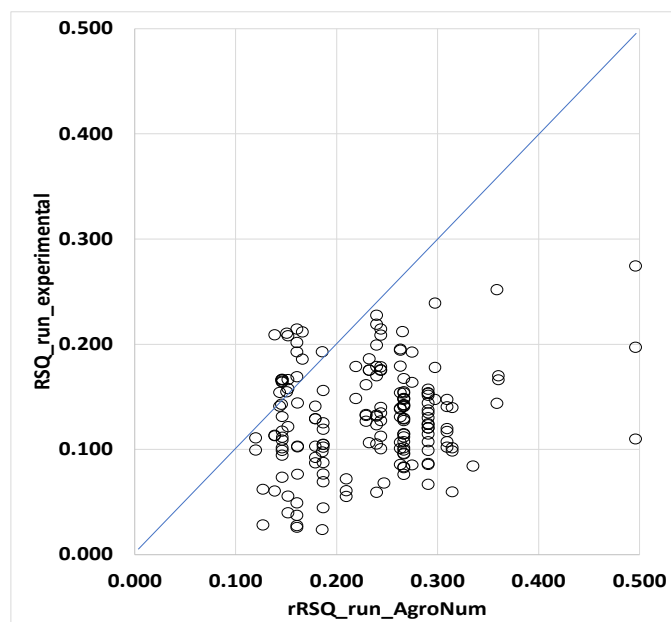
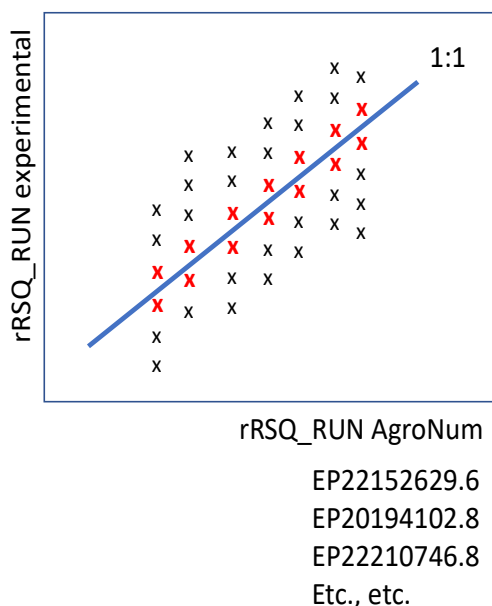
➤ **Pour ce faire, les itinéraires techniques doivent impérativement exclure les rendements unitaires, RUN, trop faibles et trop élevés ;**

Pour atteindre cet équilibre constant entre RDN_grain & RDN_rcs, les itinéraires techniques aux rendements unitaires azotés, RUN, soit trop élevés ou trop faibles doivent être identifiés et exclus du jeu de donnée. Or ;

- Il est reconnu que les RUN **trop faibles** favorisent non seulement les reliquats d'azote minéral source de pollution mais aussi l'attaques de la matière organique carbonée par les microorganismes du sol aux ratios C/N faibles et donc friand d'azote minéral.
- Il est aussi reconnu que des RUN **trop élevés** vont nécessairement appauvrir en azote les résidus de culture aux sols post-récolte nuisant ainsi à leur humification en matières organiques stables, elles aussi aux ratios C/N plutôt faibles d'environ 8 à 10.

Une base de données géoréférencée & pan-européenne contenant des milliers de tels RUN *médians* sert donc au paramétrage d'un algorithme d'intelligence artificielle capable de **rétro-calculer** précisément pour différents TUN les RDN_grain associés à de tels RUN médians.

Figure 9 : Sélection réitérative des (16220 !) itinéraires-techniques expérimentaux les plus durables par exclusion des rendements unitaires, RUN, trop faibles & trop élevés par rapport aux préconisations rRSQ d'AgroNum. Les itinéraires retenus (x rouges), sont inclus dans la base de données et le modèle AgroNum™ reparamétré avant d'être de nouveau appliqué à d'autres données RUN expérimentales d'autres lieux. Et ainsi de suite, réitérativement jusqu'à ce qu'une précision de prédiction soit atteinte (Figure 10).



À titre d'exemple (Figure 9) tiré de EP22152629.6, la référence AgroNum (rRSQ_run, en abscisse) indique que seulement certains itinéraires techniques expérimentaux avec des RSQ_run (RUN) proches de la droite [1 :1] seront retenus putativement comme durables en prévision d'un n^{ième} re-paramétrage réitératif de l'algorithme. Nb. Les quelques valeurs expérimentales RSQ_run rapportées ici sont pour la plupart *en dessous* de la droite (infra).

[A propos de RSQ. L'évaluation de la durabilité des itinéraires techniques comporte un *triple ajustement*, selon iSQ, d_{RUN}, et rRSQ (EP22152629.6 ; figure 3) de manière à exprimer *rationnellement* RDN et RUN sans risques de dérive numérique. Les rendements unitaires simples, run, sont ainsi ajustés par une valeur, d_{RUN}, standardisée fonction du taux de fertilisation de manière à comparer des modalités à taux de fertilisation, TUN, différents. Ce premier ratio est ensuite réajusté selon un quelconque indice de la productivité inhérente de la parcelle, iSQ, de manière à comparer des parcelles de lieux et agro-pédoclimats contrastés. Enfin, ces rendements unitaires ainsi réajustés sont comparés à la référence AgroNum™ durable, rRSQ, propre à la parcelle. Voir EP22152629.6, ou contactez Polyor SAS.]

- **Un algorithme, AgroNum™, calcul pour chaque parcelle les besoins unitaires (kg-N_{fert}/kg-N_{grain}), a_AgroNum, des itinéraires techniques les plus durables :**

Ce rétro-calcul est effectué comme suit ;

$$RDN = TUN/a_AgroNum$$

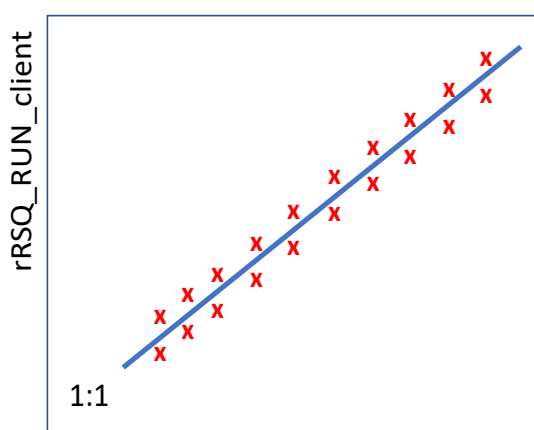
$$\text{sachant que, } a_{AgroNum} = \frac{1}{\sqrt{RUN \times d_{RUN}}},$$

$$\text{et que } RUN = rRSQ_{RUN} \times iSQ$$

a_AgroNum est ici le besoins unitaire de l'itinéraire technique ou de la pratiques culturale durable, concept nouveau en fertilisation raisonnée, et d_{RUN} un facteur d'ajustement de RUN selon TUN de manière à permettre la comparaison de RUN à différents TUN. Empiriquement & putativement, $d_{RUN} = 1400 \times TUN^{-1.5}$.

À titre d'exemple (Figure 10) tiré de EP22210746_8, la mise en relation des valeurs a_AgroNum (kg-N_fertilisant/kg-N_grain) préalablement connues (observées) et prédites (simulées) à l'aide de l'algorithme AgroNum™. Pour réaliser cette validation, 15% du jeu de données d'itinéraires techniques durables est retenu.

Figure 10 : Application de l'algorithme AgroNum™ paramétré à l'aide de rendements unitaires, RUN, d'itinéraires techniques durables au sens entendu. Chaque parcelle est ainsi dotée de RUN durables rétro-calculés à divers taux de fertilisation azotés, TUN. Connaissant ainsi, a_AgroNum, une courbe de réponse RDN_{grain}::TUN AgroNum™ est créée pour chacune des parcelles-clients (Figure 11). Surtout, la prédiction (simulation) d'a_AgroNum est très précise à hauteur de 95%.



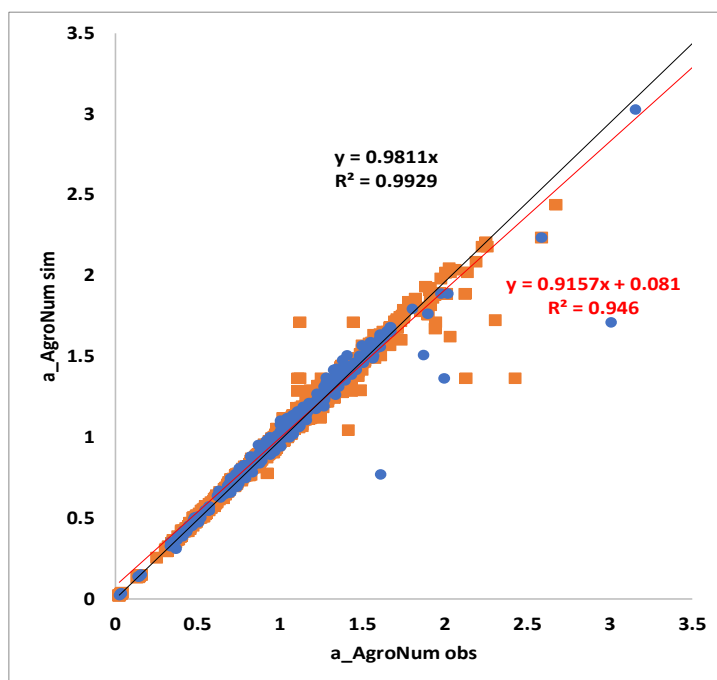
rRSQ_RUN_AgroNum

EP22152629.6

EP20194102.8

EP22210746.8

Etc., etc.



➤ **a_AgroNum permet de rétro-calculer à divers TUN les objectifs de rendemens azotés, RDN, les plus durables rapportables sous la forme de courbes de réponse, CRP_N.**

L'algorithme AgroNum™ va donc générer en chaque « lieu » où est située une parcelle agricole une série d'objectifs de RDN_grain durables selon divers TUN. Ces couples RDN :: TUN sont avantageusement rapportés par une **courbe de réponse à l'azote CRP_N** (Figure 11), fonction en puissance $RDN_{grain} = a1 \cdot TUN^{b1}$ | $b1 \approx 0.2500$. Ces courbes de réponse servent pour l'ajustement dynamique intra-annuelle selon la météo, ou encore intra-parcellaire par modulation selon l'hétérogénéité du sol des doses prévisionnelles d'engrais azoté. Il s'agit donc de fertilisation raisonnée à l'aide de doses prévisionnelles appliquée à l'agriculture durable.

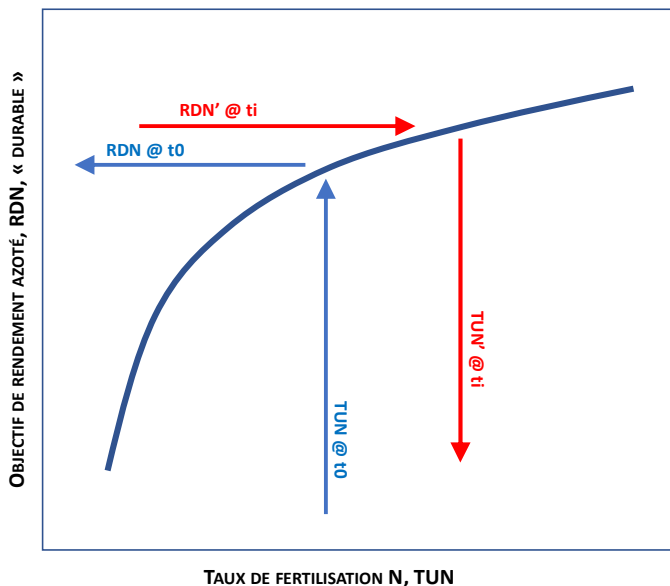


Figure 11 : Courbe de réponse à l'azote fertilisant, CRP_N schématisée applicable à l'ensemble des grandes cultures non-Fabaceae y compris notamment les céréales d'hiver et de printemps, le colza, le maïs et le tournesol. L'approche est dynamique parce que les objectifs de rendements et doses prévisionnelles initiaux au temps t_0 peuvent par la suite être adaptés et modulés au temps t_i selon l'évolution de la météo et/ou de l'hétérogénéité de la parcelle. (cf. EP22210746.8).

À titre d'exemple, au Tableau 2 un lieu dont les coordonnées GPS les plus au centre de la parcelle sont [48.06772 / N 01.50613], les préconisations AgroNum™ seraient les suivantes. A noter les valeurs de $aN1$, $Na1$, et plus pratiquement et habituel TUN et RDN à 125% de $Na1$.

Tableau 2 : Exemple d'analyse AgroNum™ proposée à un hypothétique client (« 9999 »).

Champs. dont certains reportés directement de www.polyor.fr	Unités	Valeurs
Numéro client attribué par Polvor SAS	NA	9999
Coordonnée GPS la plus au centre de la parcelle, longitude	WGS84	01.50613
Coordonnée GPS la plus au centre de la parcelle, latitude	WGS84	48.06772
Unité administrative Eurostats, NUTS2	NA	FRB0
Indice de productivité (cf. Toth et al. 2013), iSQ	NA	8.800
RDN durable sans fertilisation-N (azb), $aN1$	kg-N grain/ha	41.94
RDN durable « pivot » lorsque $RDN \equiv TUN$, $Na1$	kg-N grain/ha	147.53
TUN initialement souhaité par l'agriculteur	kg-N fert./ha	100
Objectif durable de RDN proposée	kg-N fert./ha	133.78
RDN initialement recherché par l'agriculteur	kg-N grain/ha	100
Doses prévisionnelle, TUN, correspondante	kg-N fert./ha	31.49
TUN recommandable équivalent à 125% de $Na1$	kg-N fert./ha	184.46
Objectif de rendement azote durable, RDN, à ce TUN = 125% de $Na1$	kg-N grain/ha	156.10
Rendement unitaire simple à ces TUN & RDN recommandables	kg-N grain/kg-N fert.	0.846

Le bulletin d'analyse/préconisation AgroNum™ au Tableau 2 est pour certains désespérément simple. Il ne comporte que les quelques données déjà inscrites par l'utilisateur via www.polyor.fr, à savoir les coordonnées GPS latitude & longitude les plus au centre de la parcelle. Le nom de l'unité administrative NUTS2 Eurostat, ainsi qu'une variable, l'indice iSQ (Toth et al. 2013) sont aussi rapportées. Deux valeurs clés, $aN1$ et $Na1$ révèlent concrètement le niveau de productivité durable de la parcelle, ici élevées puisqu'il s'agit d'une parcelle du bassin Parisien plutôt fertile. Si l'utilisateur/trice souhaite valoriser un TUN en particulier (eg. 100), l'objectif RDN durable correspondant est indiqué (134). Inversement, un objectif de RDN, ici plutôt faible de 100, correspondra à un TUN encore plus faible d'à peine 32 kg-N_fert./ha. C'est pourquoi AgroNum™ propose spontanément des TUN équivalent à environ 125% du RDN « pivot » correspondant ici à un RDN durable d'environ 156 kg-N_grain/ha. Notons que le rendement unitaire est ainsi d'environ 85%, et convient bien aux habitudes des céréaliculteur/trices les plus productifs/ives d'aujourd'hui.

Ce type de préconisation AgroNum™ a été réalisé en plus de 1300 lieux à travers l'Europe; les parcelles en ces lieux sont représentées géographiquement à la Figure 12. De plus, un «méta-modèle» a été développé et mise en œuvre. Celui-ci facilite et améliore l'interactivité en temps réel d'AgroNum™.

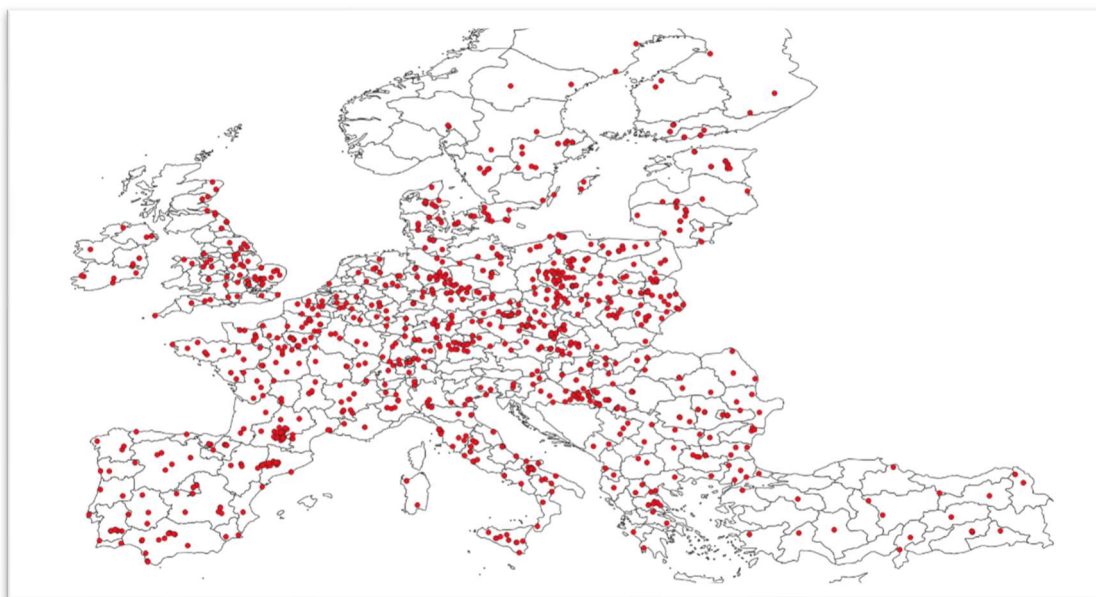


Figure 12 : Répartition géographique des 1392 lieux en Europe des parcelles agricoles utilisées pour le paramétrage du méta-modèle AgroNum™. Le fond de la carte révèle un indice de la texture du sol dérivé d'ESDAC. Chaque parcelle agricole comporte aussi nécessairement un indice, iSQ, de la productivité inhérente de la parcelle.

Pour le moment, AgroNum est applicable au Balkans, mais non en Turquie du fait de trop de valeurs pédoclimatiques peu/pas renseignées. De plus, la SAU de la Turquie orientale n'est vraiment tempérée. L'application d'AgroNum™ en Turquie suivra.

Pour terminer, notons qu'AgroNum™ est parfaitement interoperable avec les technologies d'agriculture de précision et de micro-climatologie prédictive. La courbe de réponse à l'azote, disons CRP_N, récapitule à titre de doses prévisionnelles les différents taux de fertilisation azotée. Ces TUN peuvent être fractionnés en apports appliqués au fil du temps selon le développement de la culture et son état *azoto-nutritionnel*. Il est parfois avantageux, dans le cadre d'une agriculture de précision, de moduler ces apports à l'aide de cartes de modulation et/ou de prévisions dites *baysiennes*. Dans tous les cas, il y a interopérabilité entre la courbe de réponse CRP_N et l'une ou l'autre des susdites technologies de communications, réseaux cellulaire, wifi, des cartes mémoires, *clouds*, clefs USB insérables, ou encore par téléphone, facsimilé, ou simple activation manuelle, vocale ou écrite.

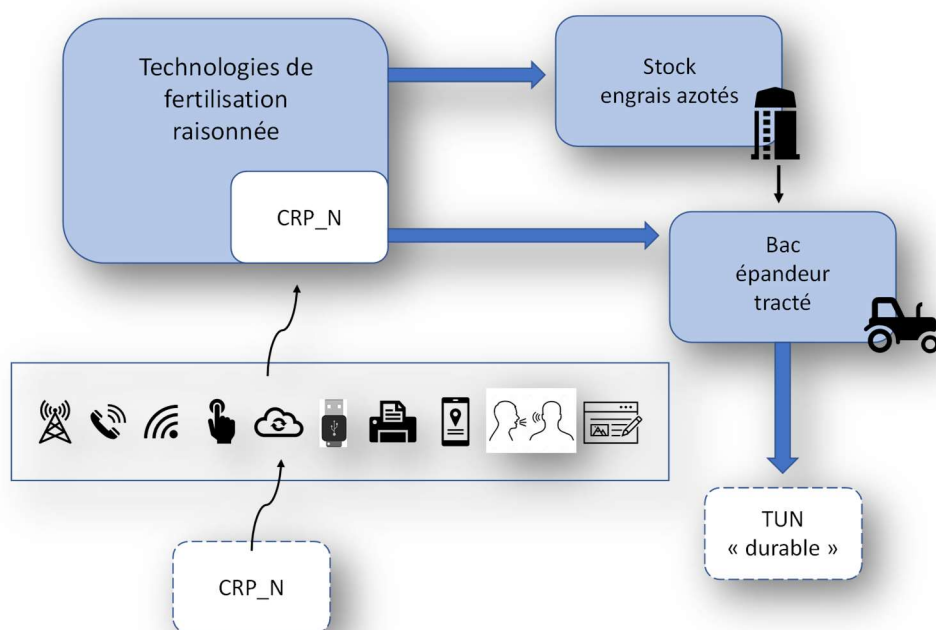


Figure 13 : Représentation schématique de l'interopérabilité d'AgroNum™. Cette technologie de fertilisation raisonnée va nécessairement affecter la composition, la formation et l'application des doses-prévisionnelles d'engrais azotés au champs, peu importe l'interface entre l'algorithme et le mécanisme d'application pondérale. Il s'agit donc d'une application de l'intelligence artificielle au développement de l'agriculture durable.

Résumons. L'aspect même des courbes de réponses AgroNum reflète l'enrichissement progressif en azote des résidus de culture selon le taux de fertilisation-N, TUN (kg-N_fert./ha). Cet enrichissement progressif en azote des résidus de culture, phénomène bien connu, assure leur humification en matière organique du sol sans augmenter les reliquats d'azote post-récolte ou l'émission de protoxyde d'azote (N₂O).

AgroNum™ favorise la durabilité des pratiques culturales, peu importe le type de culture ou l'itinéraire technique, en préconisant des objectifs de *rendements azotés*, RDN, aux *rendements unitaires*, RUN, ni trop élevés, ni trop faibles. On évite ainsi des situations ;

- (i) soit propices à la dégradation de la matière organique du sol et la pollution aux nitrates de la zone *vadose* (sic) lorsque les RUN est relativement faible,
- (ii) soit peu propices à la formation de la matière organique du sol faute d'humification des résidus de culture abondants trop pauvre en azote lorsque RUN est relativement élevé.

L'accumulation de la matière organique du sol est tributaire des rendements agronomiques et des quantités de résidus de culture (Omara et al. 2019/bis, Stella et al. 2019, Benjamin et al. 2016). Cela dit, la teneur en azote de ces résidus de culture (%N_rcs) augmente régulièrement avec taux de fertilisation azotée (Figures 4, 5 & 6). À hauts rendements, c'est cette relative richesse en azote des résidus de culture qui assure leur humification tenant compte d'un certain ratio carbone/azote de la matière organique du sol (Kirkby et al. 2016/bis, Janssen et al. 1996, Nicolardot et al. 2001, Cotrufo et al. 2013, Richardson et al. 2014, etc.).

En effet, si ces taux d'augmentation, b, selon TUN des RDN et des N_rcs sont comparables ($\approx 0.24 \leftrightarrow 0.26$), voire identiques, les quantités d'azote apportées au sol par les résidus de culture seront donc nécessairement proportionnelles aux objectifs de rendement azoté AgroNum, RDN. Formellement, si, $b_1 \approx b_2$ lorsque que $RDN = a_1 \cdot TUN^{b_1}$ et $N_rcs = a_2 \cdot TUN^{b_2}$, le rapport a_2/a_1 est constant (Figure 8). Cette proportionnalité a_1/a_2 entre N_rcs & RDN assure l'humification des résidus de culture, et donc de leur éventuelle séquestration, ou stockage, dans les sols entant que matière organique stable; voire par exemple Van Groenigen et al. 2017.

Ces coefficients d'accroissement b_1 et b_2 aux alentours de $0,24 \leftrightarrow 0,26$ sont donc constants peu importe le lieu, la culture ou la pratique culturale. C'est cette synchronisation des objectifs de rendements azotés RDN AgroNum et des teneurs en azote des résidus de culture (%N_rcs), ou encore des quantités d'azote (kg-N_rcs/ha) retournées aux sols par ces résidus, qui assure l'humification de ces pailles en matière organique stable. Une méta-analyse d'une vingtaine d'articles scientifiques révèle que ces valeurs de b_2 sont bel et bien assez généralisées.

Le proportionnalité a_2/a_1 et l'égalité $b_2 \approx b_1$ constituent une certaine validation d'AgroNum™. Pour preuve, ici (Figure 14) une courbe de réponse AgroNum™ (CRP_N) des objectifs de rendements, RDN, à l'azote fertilisant, TUN, parfaitement en accord avec celle d'une expérience de longue-durée (LTE ; Van Grinsven et al. 2022). Les objectifs de RDN AgroNum™ progressent à peu près aux mêmes taux que les teneurs en azote de résidus de culture, %N_rcs, ou encore de de l'¹⁵N foliaire restant dans les résidus de cultures (ici, à titre d'exemple les data de Effah et al. 2022) ;

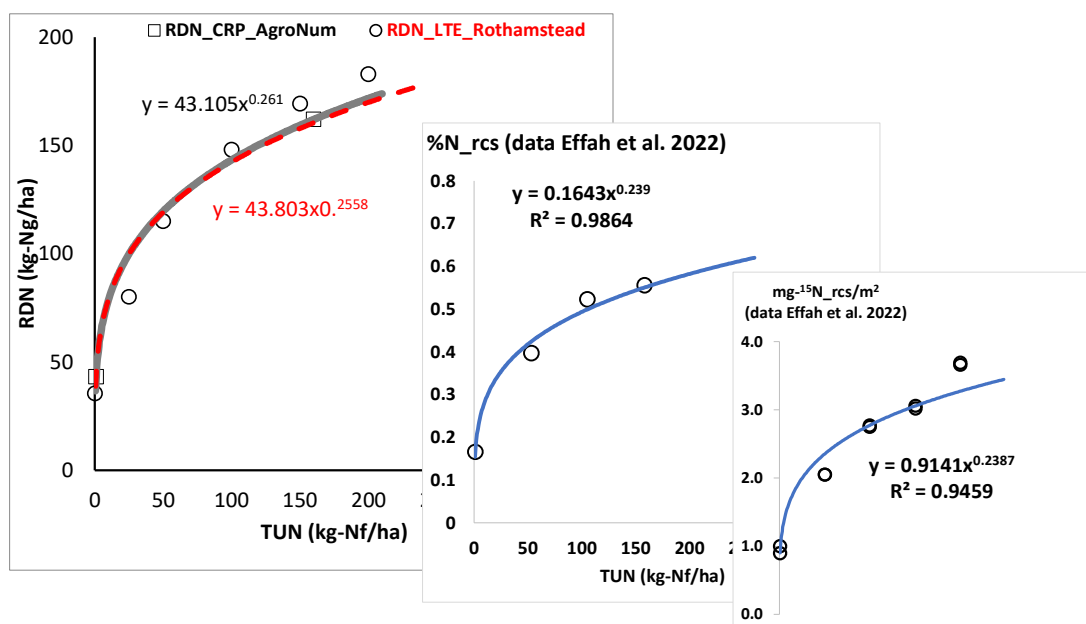
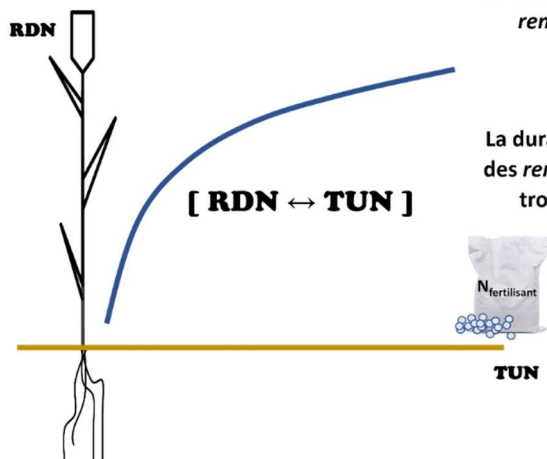


Figure 14 : Une n^{ième} validation des courbes de réponse à l'azote, CRP_N, AgroNum™ par rapport à une courbe « LTE » (van Grinsven et al. 2022), Rappelons leur analogie avec l'enrichissement en azote des résidus de culture selon le taux de fertilisation-N, TUN. Encore une fois, c'est cette analogie qui permet d'assurer l'apport de suffisamment d'azote au sol nécessaire à l'humification des résidus de culture en matière organique stable.

En agriculture durable, il faut donc (i) chercher à augmenter RUN afin de réduire l'attaque de la matière organique du sol par les microorganismes du sol friands d'azote réactif et (ii) en situations de hauts rendements, favoriser l'enrichissement en N des résidus de culture pour en assurer l'humification, quitte à minorer l'augmentation de RUN. AgroNum™ (Figure 15 ; www.polyor.fr) réalise ce délicat équilibre en éliminant les itinéraires techniques associés à des RUN soit trop faibles, soit trop élevés (EP4101280). Il en résulte un algorithme capable de sélectionner les pratiques culturales les plus durables en fixant l'objectif RDN selon le TUN.

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**.

Références (www.polyor.fr)

Figure 15 : Positionnement commercial d'AgroNum™. L'utilisateur/trice n'a qu'à renseigner les coordonnées GPS latitudes & longitudes les plus au centre de la parcelle, voire si il/elle le souhaite préciser l'objectif de rendement ou le taux de fertilisation souhaités. De facto, Polyor SAS transmettra à l'utilisateur une valeur « pivot » ($Na1$) lorsque $a_{\text{AgroNum}} = 1.00$, i.e. $\text{RDN} \equiv \text{TUN}$, voire un objectif de RDN durables pour TUN lorsque $a_{\text{AgroNum}} = 125\%$ de « pivot » $Na1$.