

# La Fertilisation Azotobactérienne et le phosphore

Pierre-Philippe CLAUDE, gérant

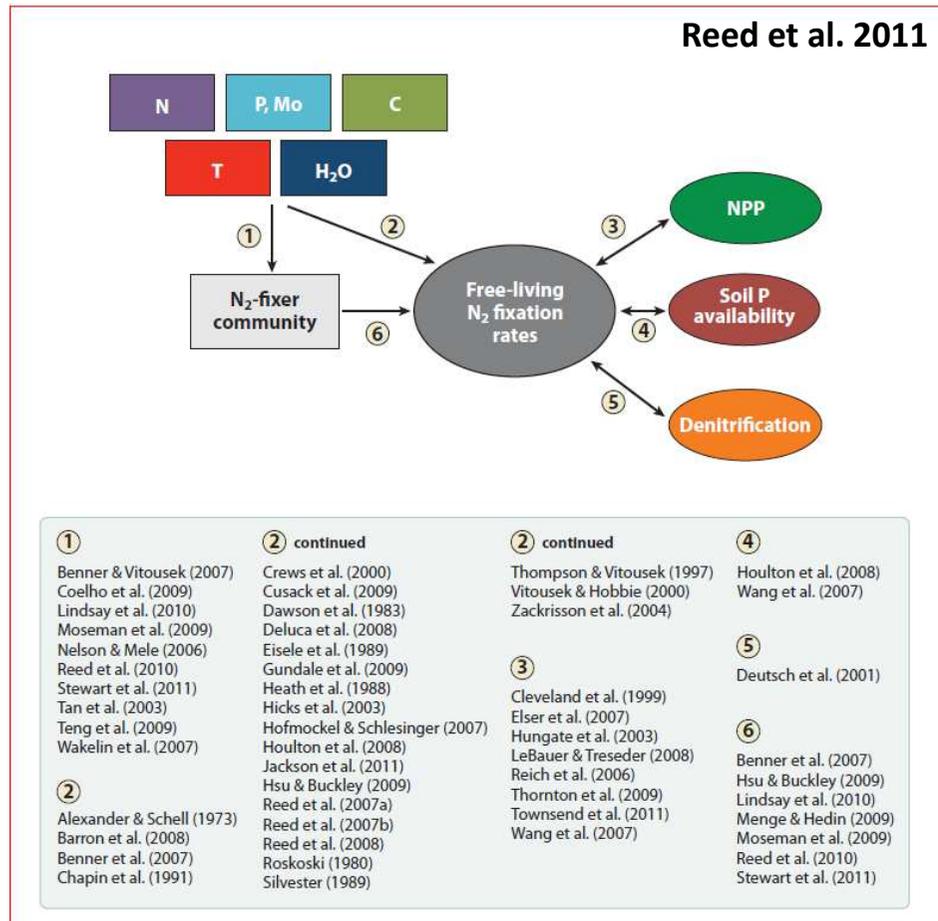
Polyor SARL

54000 NANCY

# La fertilisation azotobactérienne et le P

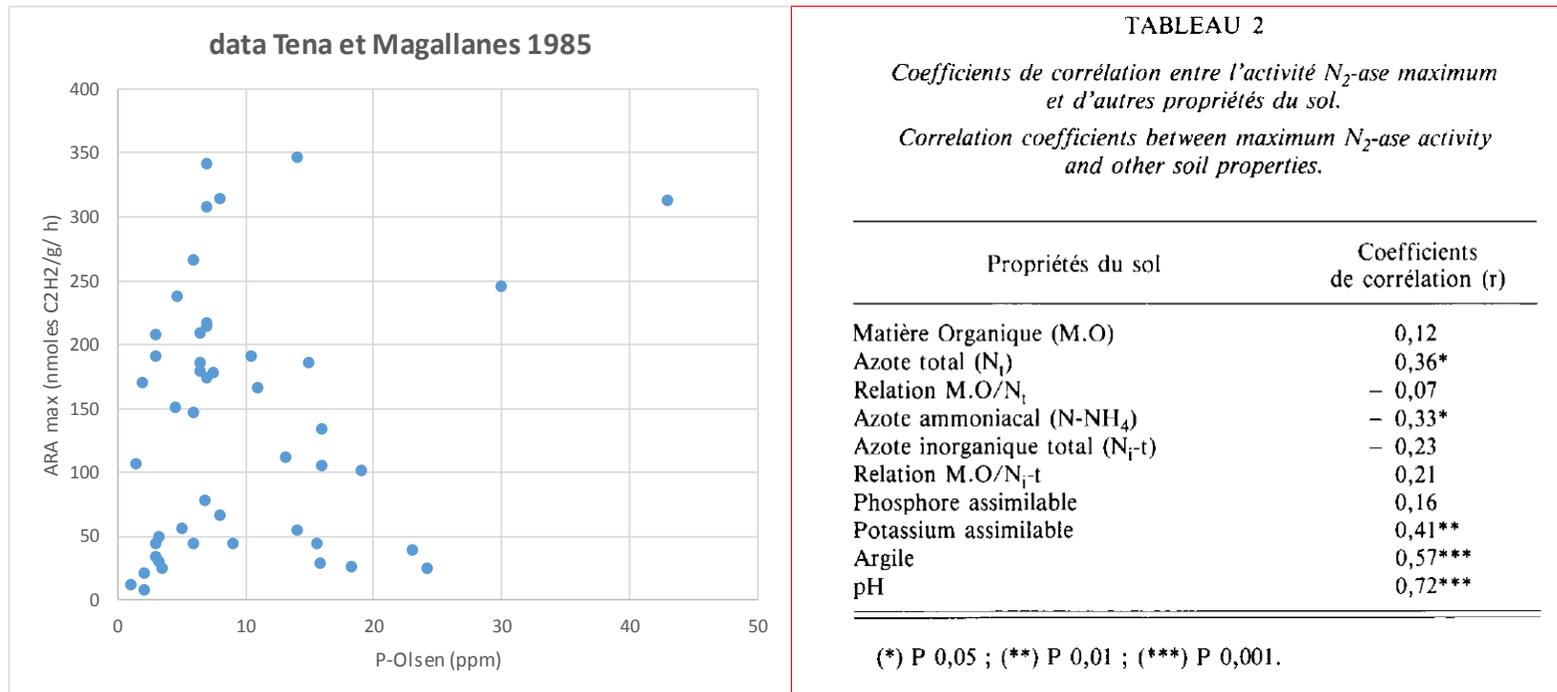
- L'activité diazotrophe des azotobactéries du sol (Fns), y compris les *Azotobacteraceae* spp., est très énergivore du fait du nombre d'ATP nécessaires au fonctionnement de la nitrogenase ; 53 MJoules/Kg-N.
- En agriculture, suite à l'abandon de la azotobactérienne (en Europe de l'ouest du moins) depuis la fin des années 30, combler de telles carence en P des azotobactéries est hors sujet.
- Polyor SARL, en développant cette fertilisation azotobactérienne ( ... *raisonnée* ; FAR) se doit de proposer une solution

# La fertilisation azotobactérienne et le P



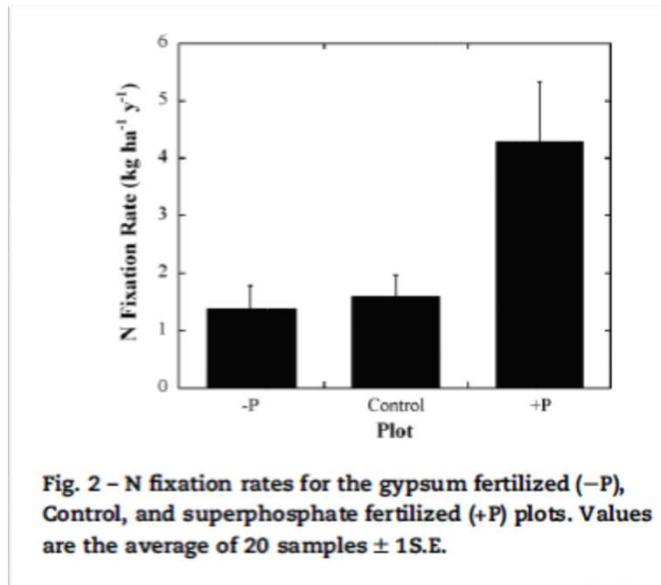
Cela dit, le problème de la disponibilité du P à la Fns n'est pas assimilable à celui du P tellurique ; les azotobactéries du sol n'accèdent qu'au P soluble, voire au P<sub>CaCl2</sub>.

# La fertilisation azotobactérienne et le P

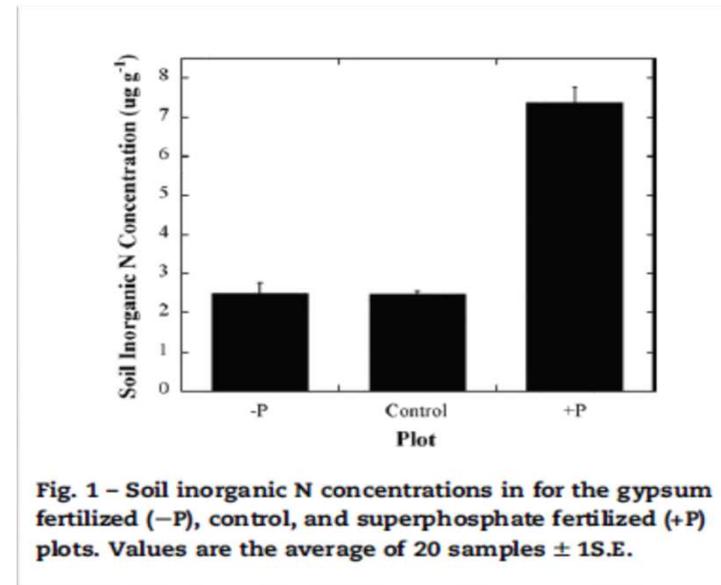


eg. En sols cultivés ; peu ou pas de relation de Fns avec  $P_{Olsen}$  (de 1 à 50) ...

# La fertilisation azotobactérienne et le P



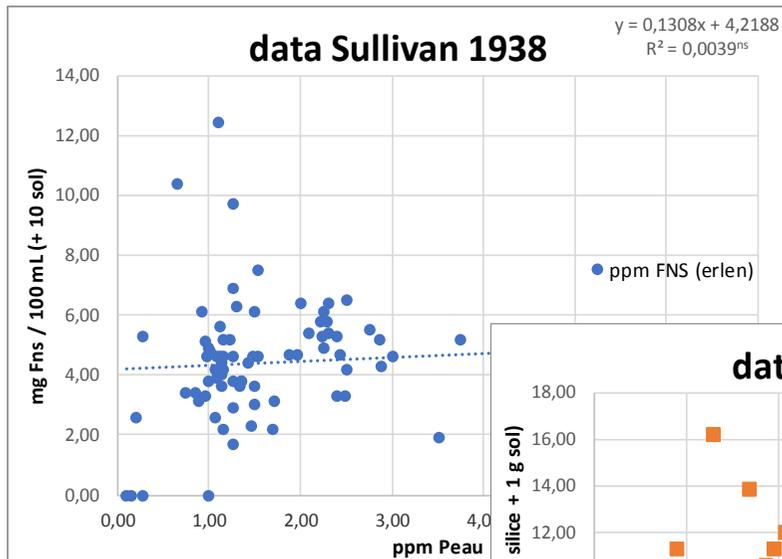
Reed et al. 2007



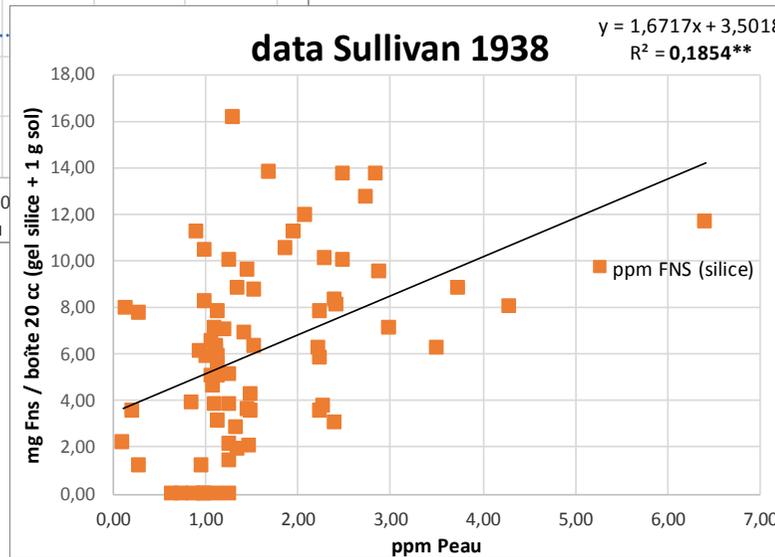
Reed et al. 2007

Par contre, en *prairie*, avec + 20 uP (DAP) ; + 5 uN<sub>total</sub>, voire + 8 uN<sub>minéral</sub> ...

# La fertilisation azotobactérienne et le P



Les azotobactéries (et non que les *Azotobacter* spp.) sont affectées par le P soluble ( $P_{eau}$ ) ... mais que sur gel de silice ...

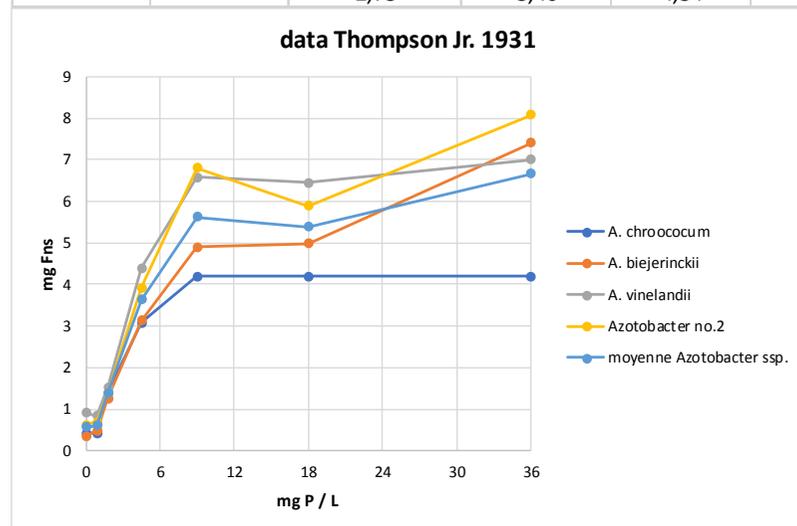


Sol (Iowa, É-U)	Peau (ppm)	ppm FNS (silice)	ppm FNS (erlen)
A	0,10	2,20	0,00
A	0,15	7,90	0,00
A	1,96	11,20	4,70
A	0,28	1,20	0,00
A	2,49	10,00	3,30
A	6,41	11,60	2,50
A	1,27	2,10	9,70
A	1,26	5,10	4,60
A	2,25	3,50	6,10
A	1,71		3,10
A	1,26	3,80	3,80
A	2,25	5,80	4,90
B	0,88	0,00	3,10
B	1,00	8,20	4,90
B	1,00	10,40	3,80
B	0,21	3,50	2,60
B	0,28	7,70	5,30
B	3,51	6,20	1,90
B	2,00		6,40
B	1,50	3,50	3,00
B	1,10	3,80	12,40
C	4,29	8,00	3,20
C	2,88	9,50	4,30
C	2,30	10,10	6,40
C	2,30		5,40
C	0,65	0,00	10,40
C	0,75	0,00	3,40
D	1,07		2,60
D	1,22	7,00	5,20
D	2,40	3,00	5,30
D	0,98	0,00	4,60
D	1,12	6,30	4,60
D	1,53	6,30	7,50
D	1,15	3,10	2,20
D	1,14	5,90	4,40
D	2,22	6,20	5,80
E	1,13	0,00	4,00
E	1,07	5,00	4,20
E	2,28	3,70	5,80
E	0,85	3,90	3,40
E	1,15	5,50	4,20
E	1,54	8,70	4,60
F	0,96	1,20	3,30
F	1,11	7,10	5,60
F	1,26	10,00	6,90
F	1,46	3,60	2,30
F		6,30	4,20
F	2,43	8,10	4,70
F	1,47	9,60	4,60
F	2,09	11,90	5,40
F	1,88	10,50	4,70
G	1,00	0,00	0,00
G	1,08	6,50	3,90
G	2,40	8,30	3,30
G	1,36	1,90	3,80
G	1,09	4,60	4,60
G	0,95	6,10	5,10
G	2,50		4,20
G	1,01	5,90	4,80
G	1,50	4,20	6,10
H	1,26	1,40	1,70
H	1,13	6,10	3,60
H	1,15	5,00	5,20
H	0,92	11,20	6,10
H	1,70	13,80	2,20
H	2,75	12,70	5,50
I	1,30	16,10	6,30
I	2,86	13,70	5,20
I	2,50	13,70	6,50
I	1,26	0,00	2,90
I	1,35	8,80	3,80
I	3,00	7,10	4,60
I	1,49	2,00	3,60
I	1,15	7,80	4,60
I	3,75	8,80	5,20
J	1,33	2,80	3,60
J	1,43	6,90	4,40
J	2,24	7,80	5,30

# La fertilisation azotobactérienne et le P

g K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> / L	g P / L	mg Fns / 100 ml				
		<i>A. chroococum</i>	<i>A. biejerinckii</i>	<i>A. vinelandii</i>	<i>Azotobacter no.2</i>	<i>moyenne Azotobacter ssp.</i>
0	0	0,43	0,35	0,91	0,63	0,58
5	0,9	0,42	0,47	0,84	0,7	0,6075
10	1,8	1,4	1,26	1,54	1,4	1,4
25	4,5	3,08	3,14	4,4	3,92	3,635
50	9	4,2	4,9	6,58	6,8	5,62
100	18	4,2	4,98	6,44	5,9	5,38
200	36	4,2	7,4	7	8,08	6,67
1000	180	3,94	4,7	7	5,88	5,38
		2,73	3,40	4,34	4,16	3,66

Pour ce qui concerne les *Azotobacteraceae* spp. ;

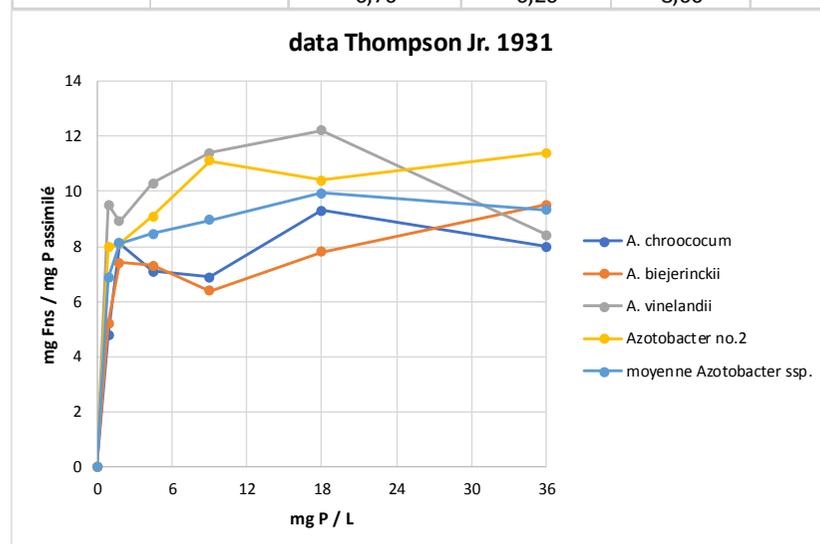


**Rendement** Fns par P soluble ; 10 ppm de Pi permettent 50 à 75 ppm de Fns

# La fertilisation azotobactérienne et le P

		mg Fns / mg P assimilée par les Azotobacter spp.				
g K2HPO4 / L	g P / L	<i>A. chroococum</i>	<i>A. biejerinckii</i>	<i>A. vinelandii</i>	<i>Azotobacter no.2</i>	moyenne <i>Azotobacter ssp.</i>
0	0	0	0	0	0	0
5	0,9	4,8	5,2	9,5	8	6,875
10	1,8	8,1	7,4	8,9	8,1	8,125
25	4,5	7,1	7,3	10,3	9,1	8,45
50	9	6,9	6,4	11,4	11,1	8,95
100	18	9,3	7,8	12,2	10,4	9,925
200	36	8	9,5	8,4	11,4	9,325
1000	180	9,9	6	8,6	9,2	8,425
		6,76	6,20	8,66	8,41	7,51

Pour ce qui concerne les *Azotobacteraceae* spp. ; (suite)



**Taux** Fns par P assimilé ; max de 10 ppm Fns dès 1 ppm P assimilé par les azotobactéries ...

# La fertilisation azotobactérienne et le P

- Les azotobactéries de la résidusphère n'ont pas *initialement* le pouvoir d'extraire le  $P_{\text{Olsen}}$  et al. accessible aux rhizosphères
- L'activité diazotrophe des azotobactéries profitent néanmoins d'apports de P, à hauteur d'environ 8 à 10 mg-P soluble dans l'eau
- Le cas échéant, comment satisfaire la P-voracité des azotobactéries ?
  - Appliquer du P soluble directement aux résidus de culture au sol ?
    - Mais à quelle dose ?

# La fertilisation azotobactérienne et le P

Comment assurer qu'initialement que les azotobactéries soit suffisamment alimentées en P ?

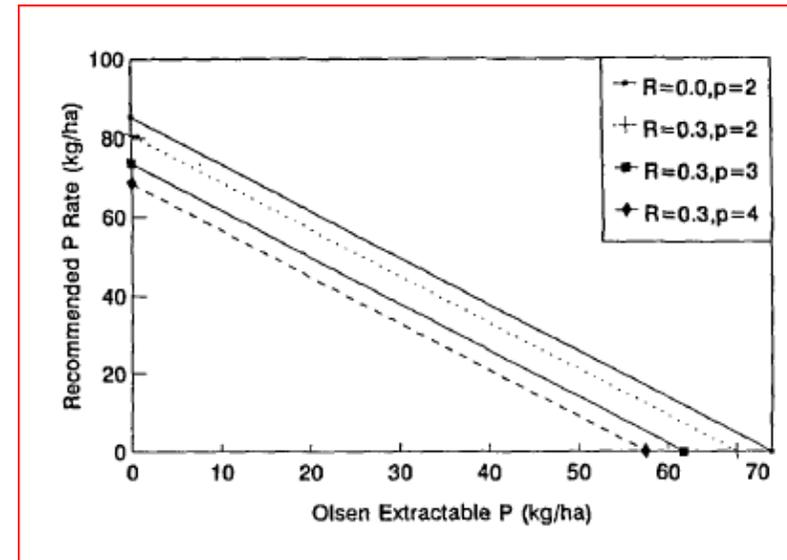
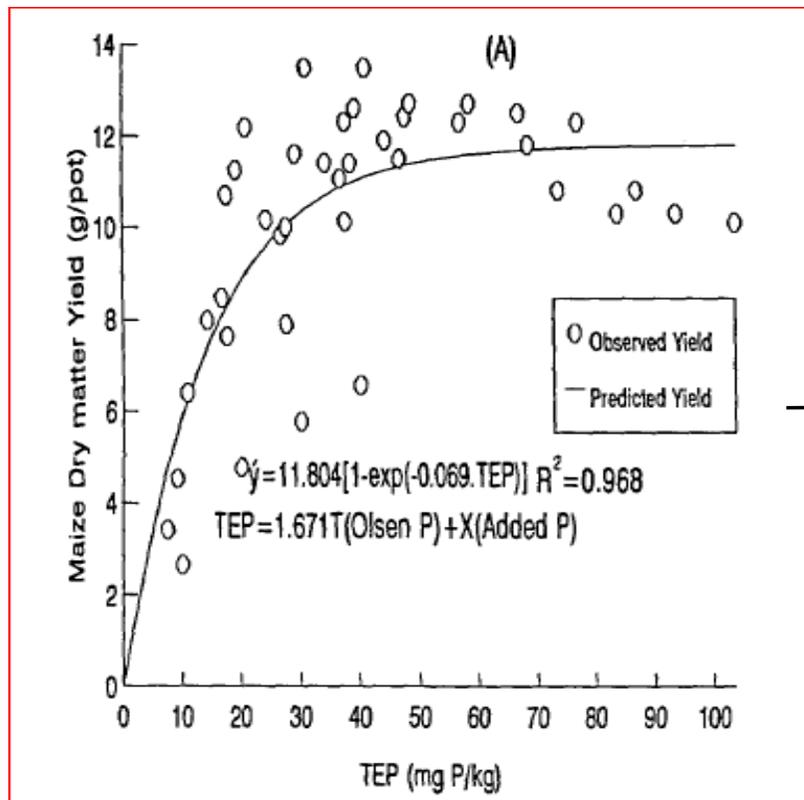
On s'inspire de l'approche agronomique pour la calibration des dP (**MIT<sub>RDT</sub>**) ;

$$RDT = A \cdot [1 - \exp(-c \cdot (\underline{b} \cdot P + dP))] \quad (1)$$

$$dP = (1 / c) \cdot \ln[c \cdot A / p \cdot (1 + R)] - \underline{b} \cdot P \quad (2)$$

... sachant que « P » est la teneur en Pi accessible à la rhizosphère (eg. P<sub>Olsen</sub>), et dP est la dose d'engrais P apportée ; A, b et c sont des constantes empiriques, tandis que p et R sont fixés à 4 et 0, respectivement

# La fertilisation azotobactérienne et le P



Ussiri et al. 1997

# La fertilisation azotobactérienne et le P

... mais on remplace le rendement (RDT) par la notion de *potentiel azotobactérien* (pAZB)

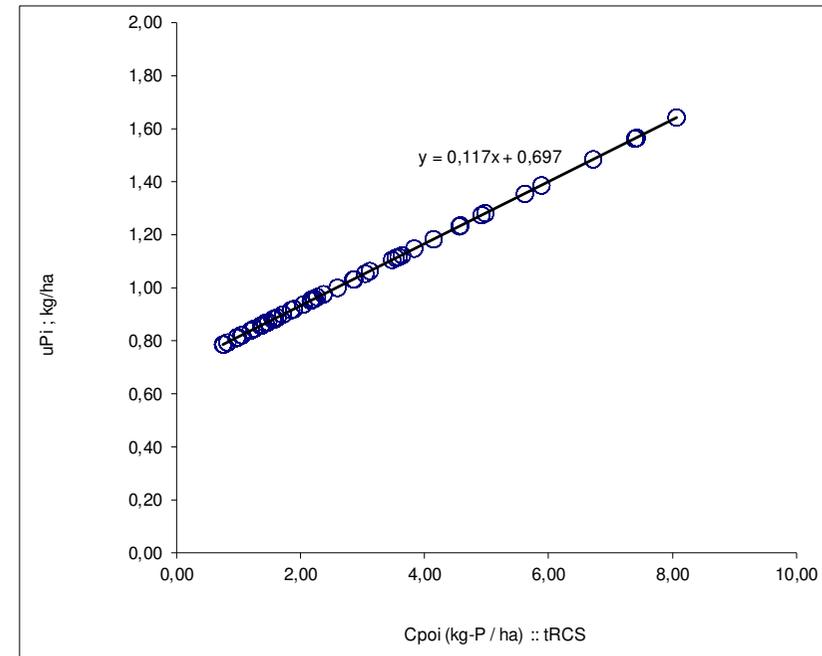
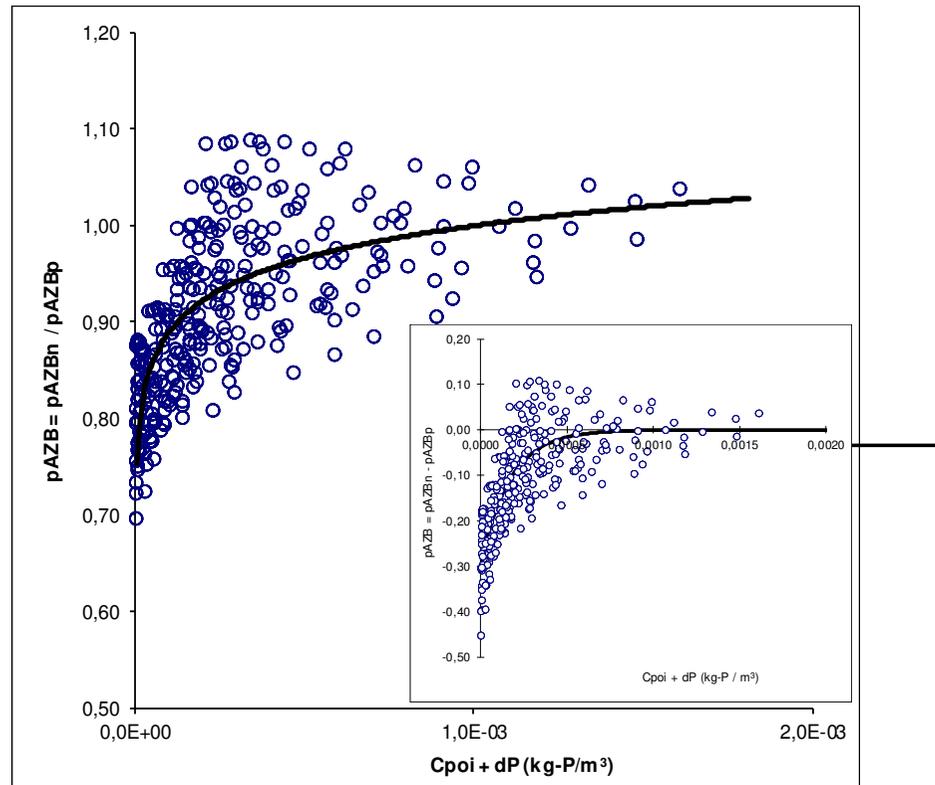
On établit ainsi combien de P à apporté au résidus de culture (**MIT<sub>AZB</sub>**) ;

$$pAZB_{1,00} = A \cdot [1 - \exp(-c \cdot (\underline{b} \cdot C_{poi} + dP))] \quad (3)$$

$$dP = (1 / c) \cdot \ln[c \cdot A / p \cdot (1 + R)] - \underline{b} \cdot C_{poi} \quad (4)$$

... sachant que « C<sub>poi</sub> » est la quantité de P (a priori organique) apporté au sol via les résidus de culture, et dP est la dose d'engrais P apportée *directement* à ces résidus de culture ; A, b, c, p et R *idem*.

# La fertilisation azotobactérienne et le P



# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

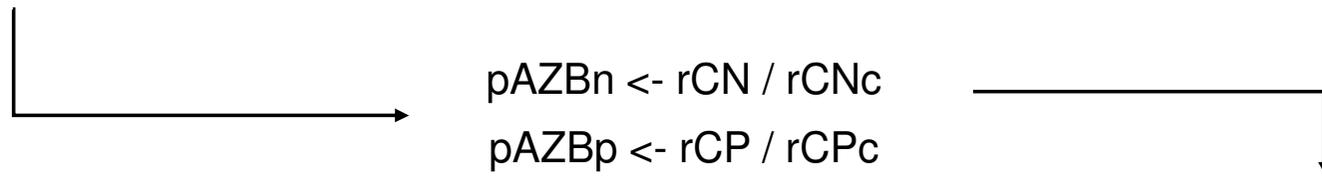
C'est la minéralisation de Cpoi qui va *en partie* alimenter en P les azotobactéries résidusphériques, et non le Pi « échangeable » du sol. Le modèle iPAZ intègre donc la « libération » continue de C, N et P selon certaines fonctions stœchiométriques préétablies ;

$$rCNc = 2,3475 \times cCNo^{0,7452}$$

$$rCPc = 2.3223 \times rCPO^{0,8430}$$

$$rNPc \leftarrow rCPc / rCNc$$

cf. **Manzoni et al. 2010**, sachant que rCNo et rCPO sont les ratios C/N et C/P au  $t_0$ , et rCNc et rCPc les ratios « critiques » pour la libération de C, N et P ...



L'N minéral libérée ( $pAZBn$ , défavorable à Fns) sera donc plus ou moins en équilibre avec le P libéré ( $pAZBp$ , favorable à Fns). A priori, l'équilibre entre les deux est le meilleur compromis pour Fns ;

$$pAZB = pAZBn / pAZBp$$

# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

Selon Poll et al. 2006 et Manzoni et al. 2010 rCN et rCP à travers la résidusphère sont fonction des concentrations initiales ( $C_0$ ) des substrats C, N et P ( $C_c$ ,  $C_n$  et  $C_p$ ) ayant migrer sur une certaine distance de migration,  $z$  (mm), à partir de l'interface sol : résidus ;

$$C(z) = C_0 \exp(rz),$$

sachant que  $r$  est défini, pour chaque type de substrats comme suit ;

$$r = \frac{v}{2D} - \sqrt{\left(\frac{v}{2D}\right)^2 + \frac{k}{D}},$$

et que  $D$  est le coefficient de diffusion effective ( $D_e$ ), et que  $k$  et  $v$  sont des coefficients empiriques définis par Poll et al. 2006. Les valeurs  $k$  et  $v$  sont spécifiées pour C, N et P (i.e.  $k_{cnp}$  et  $v_{cnp}$ , selon le cas) comme suit.

Il est donc possible de relier le taux d'utilisation microbienne du C, N et P à leurs taux de diffusion ; plus le taux de diffusion est grand, et inversement plus le taux de consommation est faible, plus chacun des substrats pourra migrer loin de l'interface sol : RCS, soit ici ~4 mm pour le cellobiose (C), ~2 mm pour  $\text{NH}_4$  (N), et ~1 mm pour les  $\text{PO}_4$  (P).

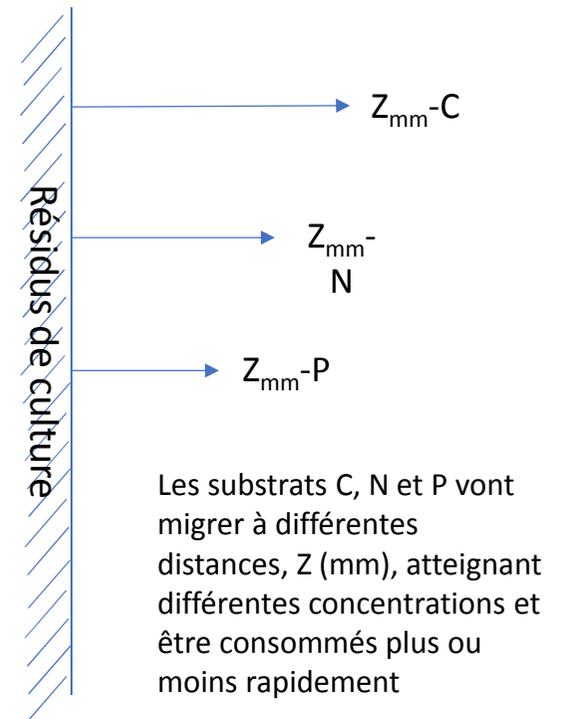
# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

Paramétrage des équations de diffusion et de consommation des substrats C, N et P selon leurs distances de migration (z, mm) à l'état stationnaire

↳ Calculs des concentrations des substrats C (cellobiose), N (ammonium) et P (phosphates) une à z (mm), respectives (cf. **Poll et al. 2006**).

↳ Module diazotrophe partie intégrante des calculs des concentrations des substrats C, N et P à z (mm).

↳ Calcul de  $pAZB = pAZBn / pAZBp$  selon les concentration des substrats C, N et P à l'équilibre une fois z (mm) atteints.





# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

« Input » data ; quantité, qualité et répartition au sol des résidus de culture ...

Variable	Unités	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	écartype (n-1)
RCS	kg/ha	3947	9000	6421	6360	1791
cRCS	%	8,00	60,00	35,00	32,80	18,51
dmm	mm	13,87	31,88	21,79	21,26	5,64
iEE-4	pixels	1,41	4,38	2,50	2,50	0,88
iRCS	sans unités	26,00	140,00	46,00	55,40	32,61
rCNo	sans unités	33,00	125,00	75,00	76,60	33,18
RDT	g/m <sup>2</sup>	42,39	306,81	171,83	168,66	93,70
Nrcs	%	0,336	1,273	0,560	0,686	0,340
ppmNm	mg/kg-sol	10,72	25,44	19,71	19,24	4,16
dPo	kg/ha	0,010	0,250	0,125	0,127	0,083

... tous ces scenarii sont placés dans un fichier .txt pour script iPAZ-R →

data iPAZ - Bloc-notes

Fichier	Edition	Format	Affichage	gRCS	cRCS	dcm	iEE-4	iRCS	rCNo	gm2RDT	Nrcs	ppmNm	dPo
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	20	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	12	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	23	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	14	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	21	0,01		
250	50			23,89	2,56	61	33	268	1,27	21	0,01		
250	50			23,89	2,56	61	33	268	1,27	16	0,01		
250	50			23,89	2,56	61	33	268	1,27	13	0,01		
250	50			23,89	2,56	61	33	268	1,27	25	0,01		
250	50			23,89	2,56	61	33	268	1,27	19	0,01		
000	10			28,18	2,00	56	33	45	1,27	25	0,01		
000	10			28,18	2,00	56	33	45	1,27	22	0,01		
000	10			28,18	2,00	56	33	45	1,27	14	0,01		
000	10			28,18	2,00	56	33	45	1,27	12	0,01		
000	10			28,18	2,00	56	33	45	1,27	16	0,01		
500	40			22,86	3,39	77	33	228	1,27	17	0,01		
500	40			22,86	3,39	77	33	228	1,27	22	0,01		
500	40			22,86	3,39	77	33	228	1,27	19	0,01		
500	40			22,86	3,39	77	33	228	1,27	24	0,01		
500	40			22,86	3,39	77	33	228	1,27	25	0,01		
000	60			20,71	3,00	62	33	307	1,27	22	0,01		
000	60			20,71	3,00	62	33	307	1,27	23	0,01		
000	60			20,71	3,00	62	33	307	1,27	19	0,01		
000	60			20,71	3,00	62	33	307	1,27	21	0,01		
000	60			20,71	3,00	62	33	307	1,27	24	0,01		
571	40			23,36	1,41	33	33	180	1,27	23	0,01		
571	40			23,36	1,41	33	33	180	1,27	25	0,01		
571	40			23,36	1,41	33	33	180	1,27	24	0,01		
571	40			23,36	1,41	33	33	180	1,27	21	0,01		
571	40			23,36	1,41	33	33	180	1,27	17	0,01		
947	8			15,84	1,63	26	33	42	1,27	23	0,01		
947	8			15,84	1,63	26	33	42	1,27	17	0,01		
947	8			15,84	1,63	26	33	42	1,27	24	0,01		
947	8			15,84	1,63	26	33	42	1,27	25	0,01		
947	8			15,84	1,63	26	33	42	1,27	11	0,01		
281	13			13,87	2,62	36	33	60	1,27	13	0,01		
281	13			13,87	2,62	36	33	60	1,27	25	0,01		
281	13			13,87	2,62	36	33	60	1,27	13	0,01		
281	13			13,87	2,62	36	33	60	1,27	22	0,01		
281	13			13,87	2,62	36	33	60	1,27	24	0,01		
270	30			14,65	2,44	36	33	164	1,27	15	0,01		
270	30			14,65	2,44	36	33	164	1,27	17	0,01		
270	30			14,65	2,44	36	33	164	1,27	20	0,01		
270	30			14,65	2,44	36	33	164	1,27	21	0,01		
270	30			14,65	2,44	36	33	164	1,27	19	0,01		
281	57			17,36	1,56	27	33	269	1,27	18	0,01		
281	57			17,36	1,56	27	33	269	1,27	22	0,01		
281	57			17,36	1,56	27	33	269	1,27	21	0,01		
281	57			17,36	1,56	27	33	269	1,27	22	0,01		
281	57			17,36	1,56	27	33	269	1,27	17	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	25	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	16	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	20	0,01		
500	20			31,88	4,38	140	33	124	1,27	25	0,01		

# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

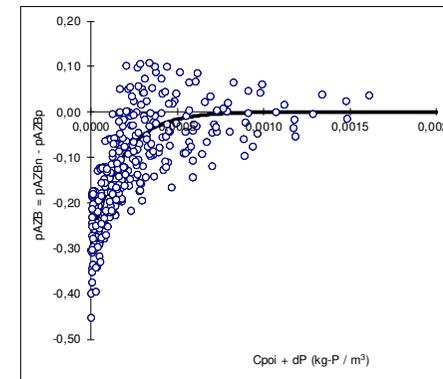
RCS, Kg/ha	Cco, kg/m <sup>3</sup>	Cno, kg/m <sup>3</sup>	Cpo, kg/m <sup>3</sup>	pAZB, ég. 3	Cpoi, ég. 4	dP, ég. 4	Cpoi, kgP/ha	dP, kgPha
5500	2,3100	0,0700	0,0040	0,8425	3,94E-03	3,94E-05	4,93	1,27
5500	2,3100	0,0700	0,0040	0,8425	3,94E-03	3,94E-05	4,93	1,27
5500	2,3100	0,0700	0,0040	0,8425	3,94E-03	3,94E-05	4,93	1,27
5500	2,3100	0,0700	0,0040	0,8425	3,94E-03	3,94E-05	4,93	1,27
8250	3,4650	0,1050	0,0060	0,8269	5,91E-03	5,91E-05	7,39	1,56
8250	3,4650	0,1050	0,0060	0,8269	5,91E-03	5,91E-05	7,39	1,56
8250	3,4650	0,1050	0,0060	0,8269	5,91E-03	5,91E-05	7,39	1,56
8250	3,4650	0,1050	0,0060	0,8269	5,91E-03	5,91E-05	7,39	1,56
4000	1,6800	0,0509	0,0029	0,7847	2,87E-03	2,87E-05	3,58	1,12
4000	1,6800	0,0509	0,0029	0,7847	2,87E-03	2,87E-05	3,58	1,12
4000	1,6800	0,0509	0,0029	0,7847	2,87E-03	2,87E-05	3,58	1,12
4000	1,6800	0,0509	0,0029	0,7847	2,87E-03	2,87E-05	3,58	1,12
7500	3,1500	0,0955	0,0054	0,8399	5,37E-03	5,37E-05	6,72	1,48
7500	3,1500	0,0955	0,0054	0,8399	5,37E-03	5,37E-05	6,72	1,48
7500	3,1500	0,0955	0,0054	0,8399	5,37E-03	5,37E-05	6,72	1,48
7500	3,1500	0,0955	0,0054	0,8399	5,37E-03	5,37E-05	6,72	1,48
9000	3,7800	0,1145	0,0065	0,8376	6,45E-03	6,45E-05	8,06	1,64
9000	3,7800	0,1145	0,0065	0,8376	6,45E-03	6,45E-05	8,06	1,64
9000	3,7800	0,1145	0,0065	0,8376	6,45E-03	6,45E-05	8,06	1,64
9000	3,7800	0,1145	0,0065	0,8376	6,45E-03	6,45E-05	8,06	1,64
6571	2,7598	0,0836	0,0048	0,7762	4,71E-03	4,71E-05	5,89	1,39
6571	2,7598	0,0836	0,0048	0,7762	4,71E-03	4,71E-05	5,89	1,39
6571	2,7598	0,0836	0,0048	0,7762	4,71E-03	4,71E-05	5,89	1,39
6571	2,7598	0,0836	0,0048	0,7762	4,71E-03	4,71E-05	5,89	1,39
3947	1,6577	0,0502	0,0029	0,7683	2,83E-03	2,83E-05	3,54	1,11

Etc.

n = 1 500 ...

→ ... fichier .txt pour script MIT<sub>AZB</sub>-R

« Output » data ; différents cas de résidusphères nécessitant plus ou moins de P afin d'assurer un équilibre entre l'immobilisation du N et du P ...



# La fertilisation azotobactérienne et le P Modèle iPAZ-R

```
rm(list=ls())
data <- scan(file = "erAZB iPAZ.txt", skip = 1, n = -1, dec = ",")
data <- matrix(data, ncol = 16, byrow = TRUE)

data

erAZB1 <- data[,13] # selon iRCS / iVAZ
Cpoi <- data[,15] # kg/m3
dCpoi <- data[,16] # kg/m3
nls <- nls.control(maxiter = 10000, tol = 0.001, minFactor = 1e-12)
data1 <- nls2(erAZB1 ~ A*(1 - exp(-c*(b*Cpoi+dCpoi))), start = list(A=1, b=0.100, c=100), control = nls, trace = TRUE)

summary(data1)
```

Formula:  $erAZB1 \sim A * (1 - \exp(-c * (b * cpoi + dcpoi)))$

Parameters:

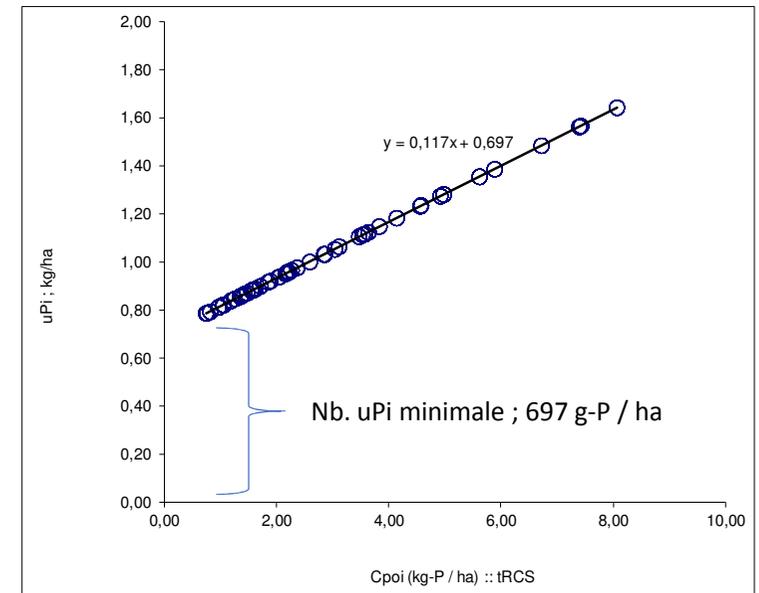
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
A	9.355e-01	2.288e-03	408.82	<2e-16 ***
b	1.169e-01	1.139e-02	10.26	<2e-16 ***
c	1.458e+04	1.143e+03	12.76	<2e-16 ***

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.07197 on 1497 degrees of freedom

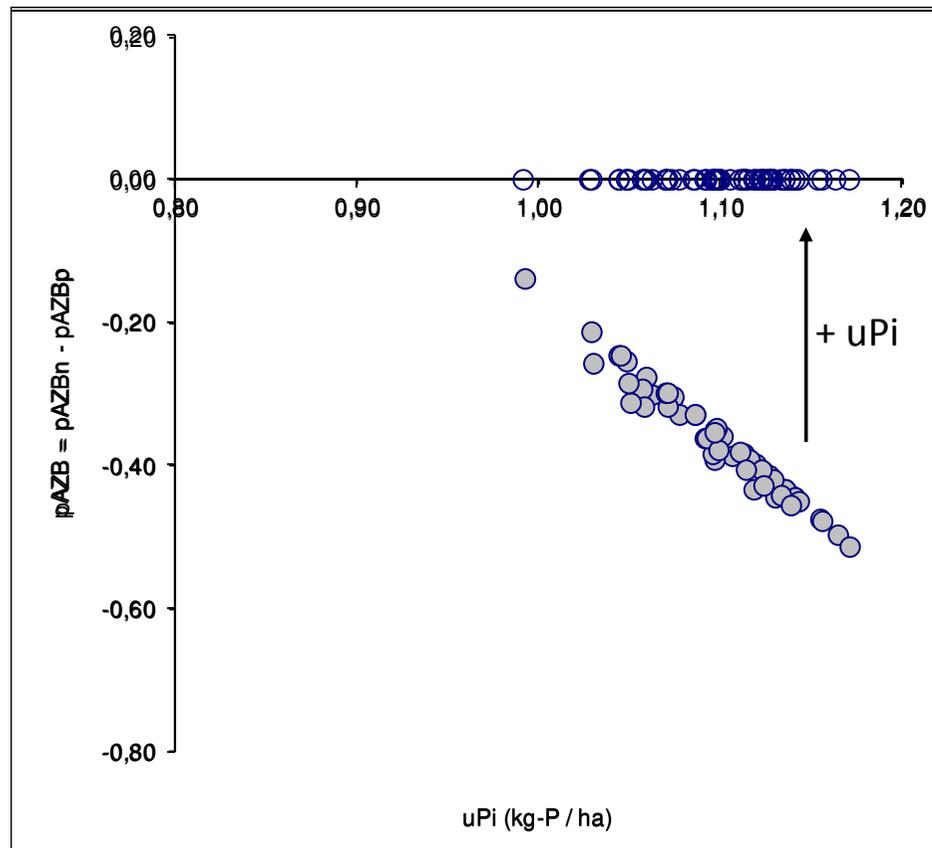
Number of iterations to convergence: 27  
Achieved convergence tolerance: 0.0007547

$$dP = (1 / c) \cdot \ln[c \cdot A / p \cdot (1 + R)] - \underline{b} \cdot Cpoi$$



« Microdoses » ( $\mu\text{Pi}$ ) de P, calibrées à l'aide de telles courbes  
uPi :: Cpoi de réponses innovantes, apportées directement au  
résidus de culture avant leur enfouissement en pré-semis de  
culture d'hivers (iPAZ)

# La fertilisation azotobactérienne et le P



L'apport des microdoses de P (uPi) aux résidus de culture va combler la carence en P des azotobactéries (pAZB = 0,00)

Plus uPi est importante (du fait de RCS plus abondants), plus l'effet de cette fertilisation en P de la résidusphère sera marquée

Cette fertilisation en P de la résidusphère peut être effectuée avec des engrais P foliaires / fertigation conventionnels

# La fertilisation azotobactérienne et le P

Exemples d'engrais phosphoriques commercialisés pouvant être utilisés dans la réalisation de la présente invention.

Produit	Fabricant	g-P2O5 / L	g-P / L	Formulation	Utilisation habituelle
Capfol™	Agronutrition, France	60	26,2	liquide	foliaire
Florilege™ Ultra	Agronutrition, France	250	109	liquide	foliaire
Solustar™ Mg	Agronutrition, France	440	192	liquide	sol (démarrage)
Solustar™ PZ	Agronutrition, France	440	192	liquide	sol (démarrage)
Starmax™ Mg	Agronutrition, France	440	192	liquide	foliaire
YaraVita™ Magphos K	Yara, France	440	192	liquide	foliaire
YaraVita™ Pentaflor	Yara, France	240	105	liquide	foliaire
YaraVita™ Seniphos	Yara, France	310	135	liquide	foliaire (fruits)
YaraVita™ Solatrel	Yara, France	440	192	liquide	foliaire
YaraVita™ Zeatrel	Yara, France	440	192	liquide	foliaire
Granoligo™ PB 29	Agronutrition, France	(14% p/p)	6,12%	granulés	sol
Granoligo™ PZ 50	Agronutrition, France	(16% p/p)	6,99%	granulés	sol
Microstar™ Céréales	Agronutrition, France	(47% p/p)	20,5%	granulés	sol
Haifa MKP™	Haifa France	(52% p/p)	225	granulés solubles	fertigation, foliaire
Hortipray™ MKP	Prayon Ltd.	(52% p/p)	225	granulés solubles	fertigation, foliaire

# La fertilisation azotobactérienne et le P

- Quelle est l'incidence des uPi sur la fertilisation azotobactérienne ?
  - Les résidus de culture au sols sont avantageusement azotobactérisés, y compris par inoculation
  - En principe, la microfertilisation en P des résidusphères améliorera l'efficacité de l'azotobactérisation (eAZB ; Traité / témoin). Cette amélioration est appréciable via l'indicateur d'eAZB, **iAZB**, et permet de calculer la dose prévisionnelle d'engrais N\*
  - Dans le cas présent, apporter un minimum de 697 g-P / ha directement aux résidus de culture permettait d'augmenter l'iAZB moyen (n = 60) de **0,220** à **0,265**, provoquant une augmentation du potentiel de rendement (pRDT), une diminution du besoin unitaire (a) et une plus grande contribution en N des azotobactéries (pAZB)

---

\* Poster no. 19 et résumé / Polyor SARL / Rencontres Comifer-Gemas, Nantes 2017

# La fertilisation azotobactérienne et le P

$$iAZB = \sum(Si \times Pi) \quad | \quad i = 1, 2, 3, \text{ etc.}$$

Chaque indicateur élémentaire d'eAZB  
*normalisé* base 1,00 (Si) et *pondéré* (Pi) par  
*analyse multivariée ou AHP\**  
est *agrégé\*\** en un seul indice, ***iAZB***, d'eAZB  
qui permet le calcul de dN ;

$$\underline{dN(eAZB) = a \times pRDT - pAZB^{***}}$$

---

\* « *analytical hierarchy process* » / Saaty 2008

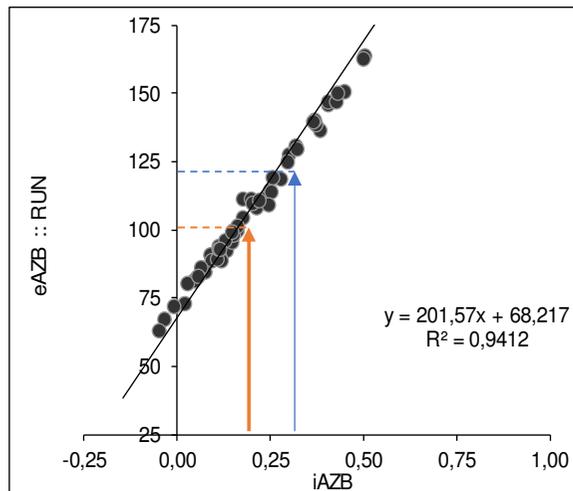
\*\* « Évaluation multicritère » / Lairez et al. 2015

\*\*\* Poster no. 19 et résumé / Polyor SARL / Rencontres Comifer-Gemas, Nantes 2017

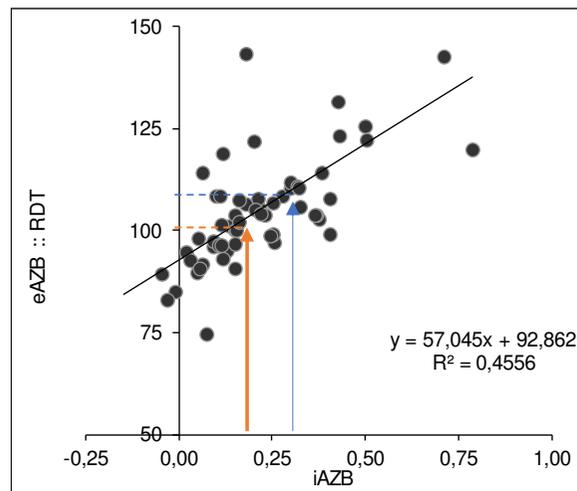
# La fertilisation azotobactérienne et le P

$$\underline{dN(eAZB) = a \times pRDT - pAZB} \text{ (data in situ, n = 60)}$$

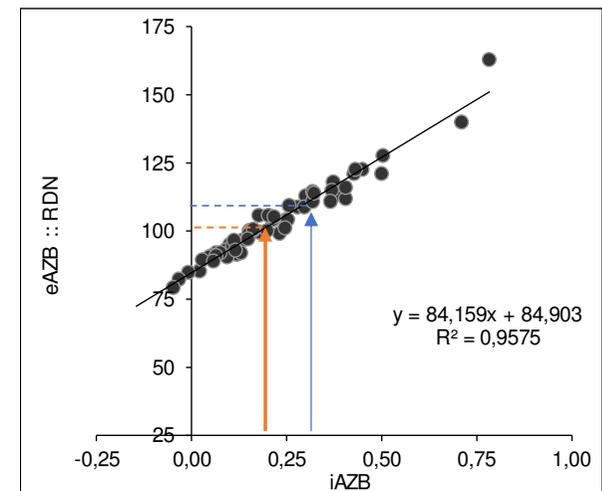
$$a = [b_{ARVALIS} / eAZB_{RUN}]$$



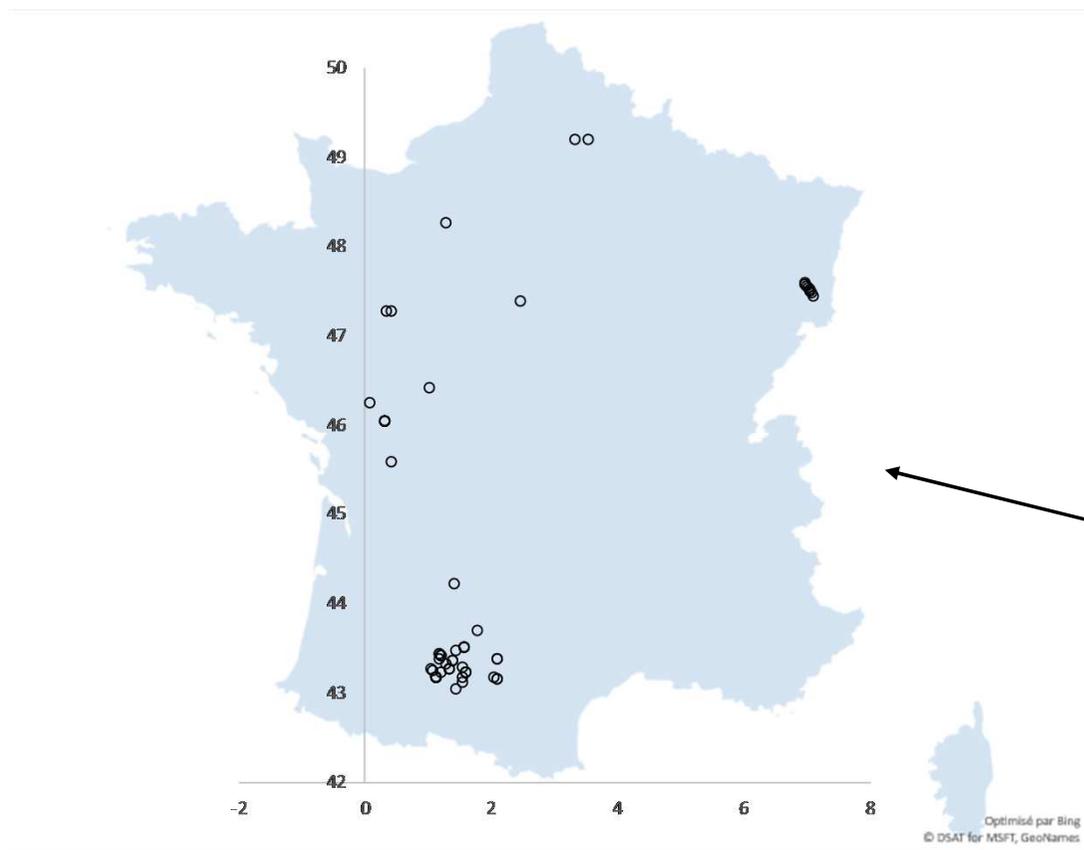
$$pRDT = [RDT_{tnt} * eAZB_{RDT}]$$



$$pAZB = [RDN - RDN / eAZB_{RDN}]$$



# La fertilisation azotobactérienne et le P



Petit historique ;

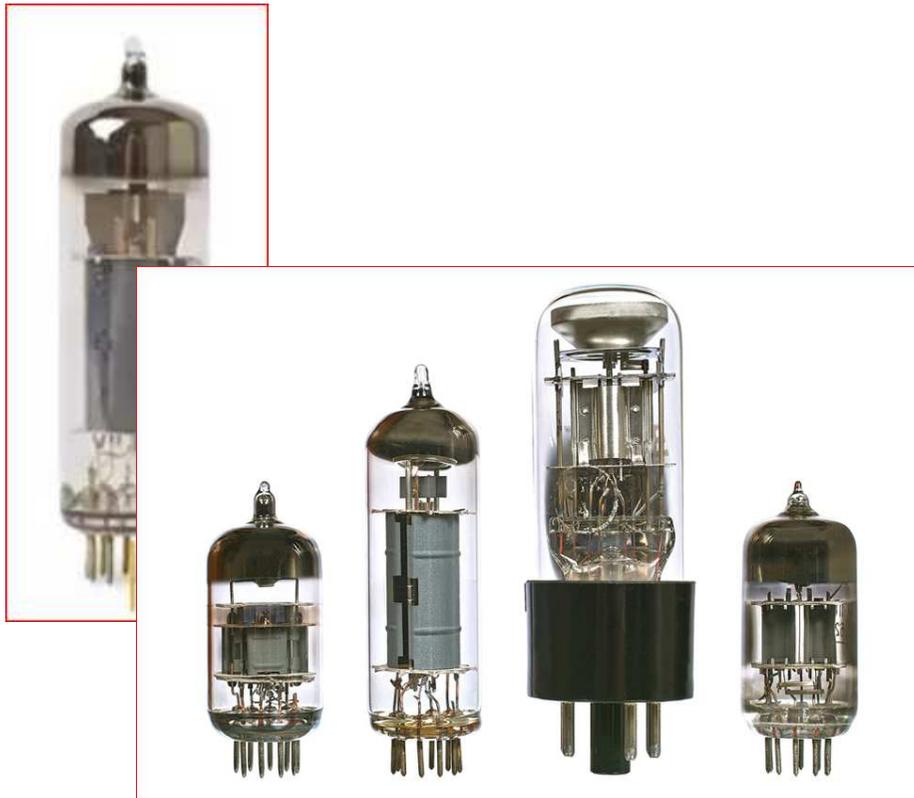
- Travaux PPC de 1997 à 2002 (Ensat)
- Valbios SA (Poitiers) de 2002 à 2006
- Polyor SARL :: Agronutrition 2008 à 2016
- Polyor SARL :: \_\_\_ ? \_\_\_ 2017-2018

➤ Plus de 200 parcelles in situ de 2004 à 2015 sur plus d'une une soixantaine (60) de sites x année ( ... modélisés Stics™)

# La fertilisation azotobactérienne et le P

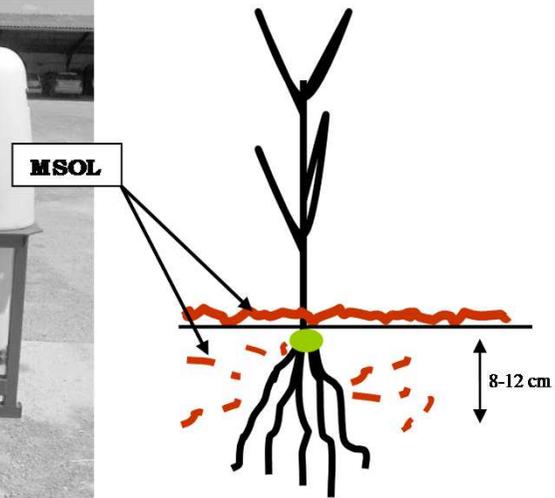
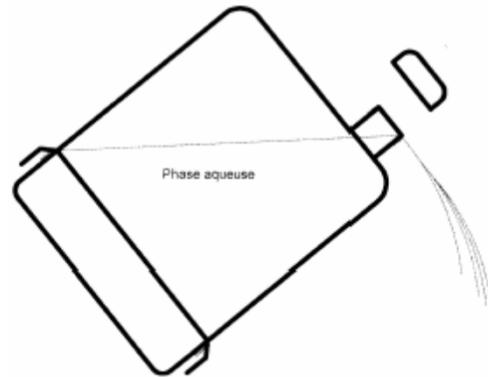
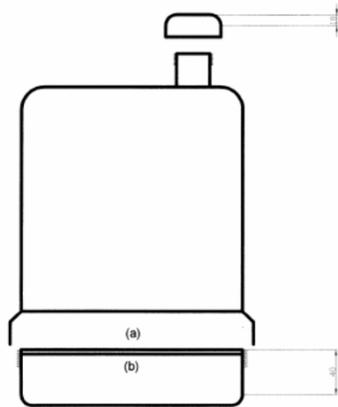
- L'apport d'engrais P solubles directement aux résidus de culture au sol est nouvelle opportunité pour les fabricants
- Sa réalisation peut se faire à l'aide de produits existants, destinés aux application foliaires par exemple
- Le dosage par ha sera nécessairement assez fin, ce qui permet d'envisager des mises au points à haut valeur ajoutée
- A venir ? ; (i) remplacer Cpoi par P $\text{CaCl}_2$  ? Courbes de calibration uPi selon type de RCS ?, etc,

# La fertilisation azotobactérienne et le P

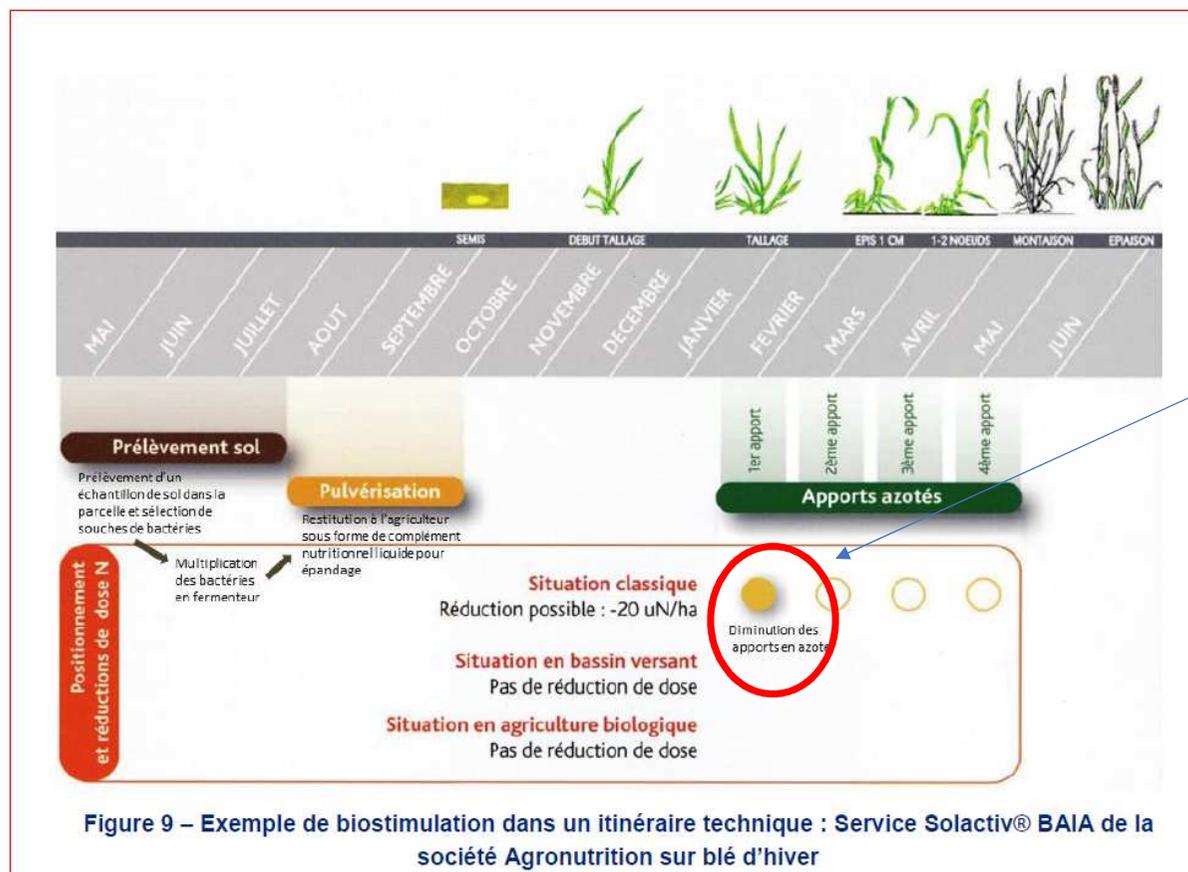


Résultats d'essais agronomiques de la fertilisation azotobactérienne, son efficacité relative (i.e. par rapport à des TNT), et son rôle dans le développement de nouvelles approches à la fertilisation raisonnée (FAR).

# La fertilisation azotobactérienne et le P



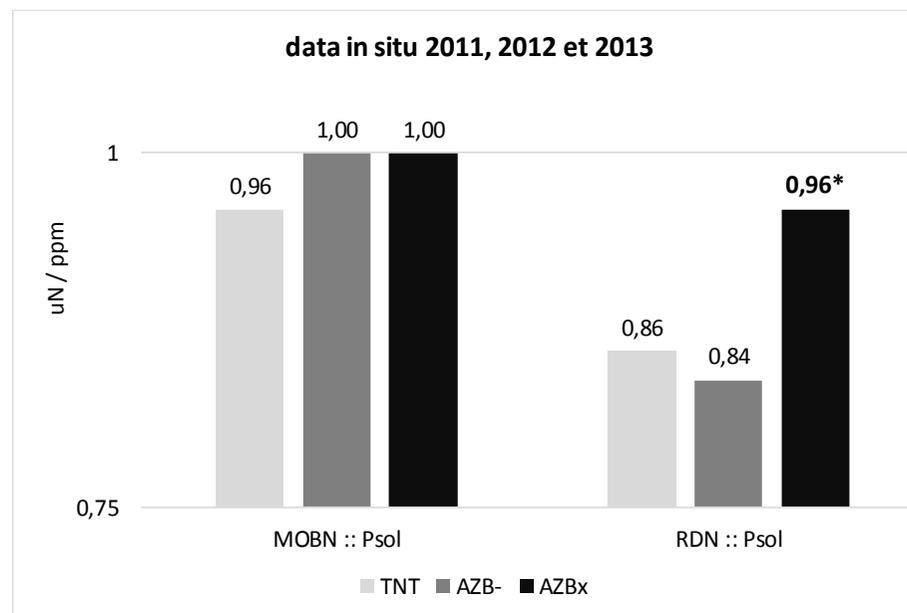
# La fertilisation azotobactérienne et le P



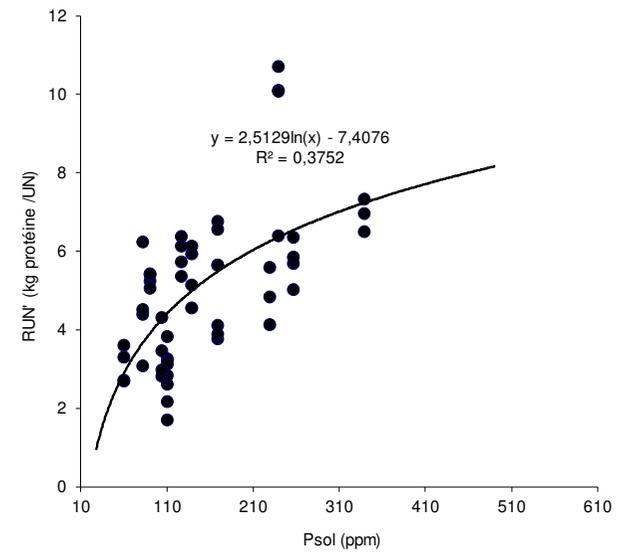
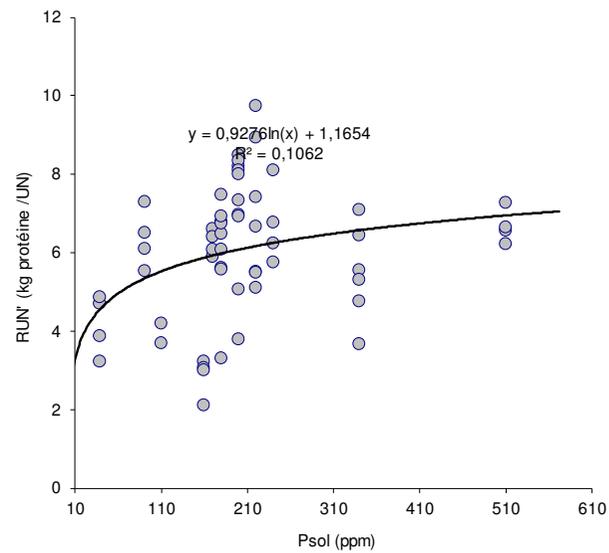
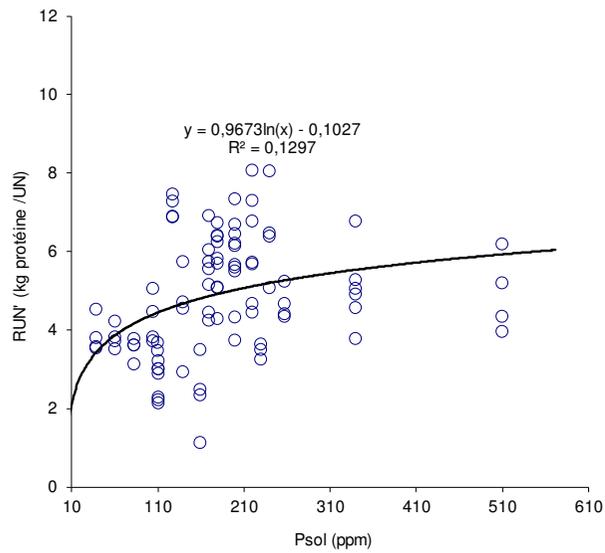
?!

# La fertilisation azotobactérienne et le P

Modalité	MOBN :: Psol	RDN :: Psol	% Pgrain
TNT	0,96	0,86	0,384
AZB <sup>-</sup>	1,00ns	0,84ns	0,396
AZB <sup>x</sup>	1,00ns	0,96(*)	0,366*

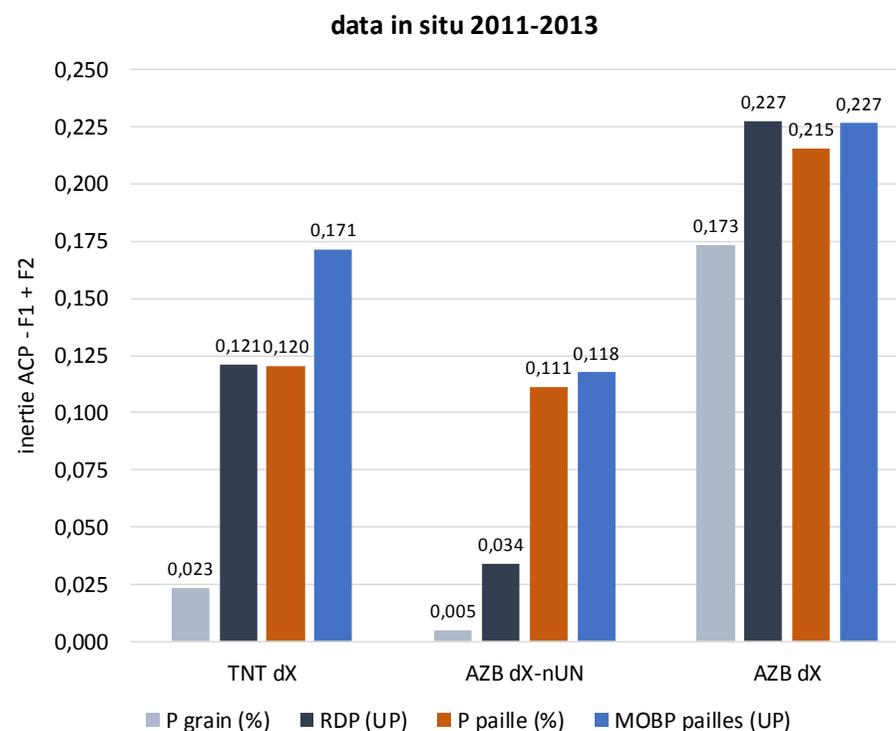


# La fertilisation azotobactérienne et le P



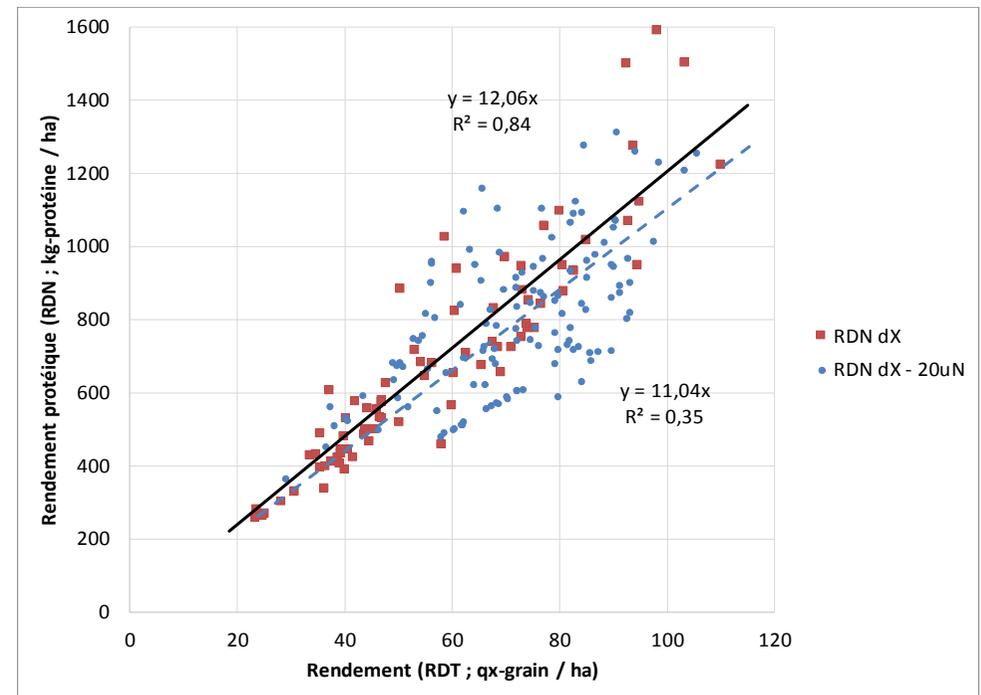
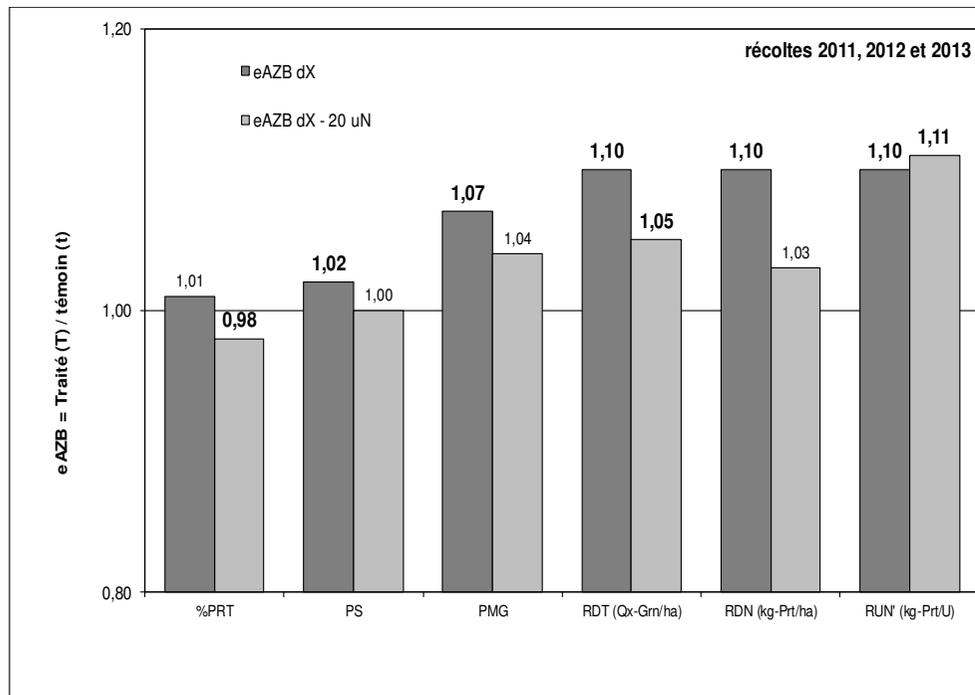
# La fertilisation azotobactérienne et le P

Inertie ACP* F1+F2	TNT dX	AZB dX--nUN	AZB dX
pH	0,014	0,079	0,085
tArgile	0,052	0,049	0,180
mOrg	0,025	0,026	0,073
Pi (ppm)**	0,000	0,062	0,058
%HUM	0,038	0,055	0,031
%PRTn	0,067	0,029	0,106
RDTn (Qx-Grn/ha)	0,186	0,152	0,223
RUN' (Qx-Grn/U)	0,131	0,128	0,224
RDNn (kg-Prt/ha)	0,185	0,105	0,250
RUN' (kg-Prt/U)	0,147	0,096	0,260
P.S. n	0,081	0,018	0,173
PMGn	0,034	0,042	0,034
CR rdt	0,114	0,148	0,157
CR rdn	0,192	0,196	0,222
CR rdp	0,189	0,003	0,208
K2O sol	0,006	0,000	0,012
MgO sol	0,048	0,185	0,025
NEP/m2	0,081	0,170	0,052
P grain (%)	0,023	0,005	0,173
RDP (UP)	0,121	0,034	0,227
MS pailles (qtx/Ha)	0,107	0,037	0,231
Nt pailles (%)	0,153	0,076	0,195
MOBN paille (UN)	0,186	0,129	0,217
P paille (%)	0,120	0,111	0,215
MOBP pailles (UP)	0,171	0,118	0,227



\*Analyses par composantes principales (Lebart et al. 2000) / \*\* cf. présentation Polyor au groupe PKMg le mardi 27 mars 2018

# La fertilisation azotobactérienne et le P



# La fertilisation azotobactérienne et le P

- La fertilisation azotobactérienne est affectée par le taux de fertilisation N, mais pas dans le sens attendu ; elle ne semble pas profiter d'une réduction de la dX.
- Pourtant ; « ... la plupart des intervenants préconisent de facto la réduction des apports d'N en présence d'*Azotobacter spp.* (eg. Martin et Brown 1938 ; Baltensperger et al. 1978 ; Yadav et al. 2003 ; Kumar et Ahlawat 2004, Senapati et al 2004, Kader et al. 2000 et 2002, Mahboob et Asghar 2002, Idris 2003) sous prétexte qu'il faut éviter la rétroaction négative via l'opéron nifLA de la nitrogenase par l'azote minéral (Brewin et al. 1999). » (Claude 2004)
- Il fallut donc trouver comment « raisonner ce rationnement » de la dX, voire redéfinir le calcul de celle-ci (~~dX~~ → « dN » ?) en tenant compte du potentiel de la fertilisation azotobactérienne

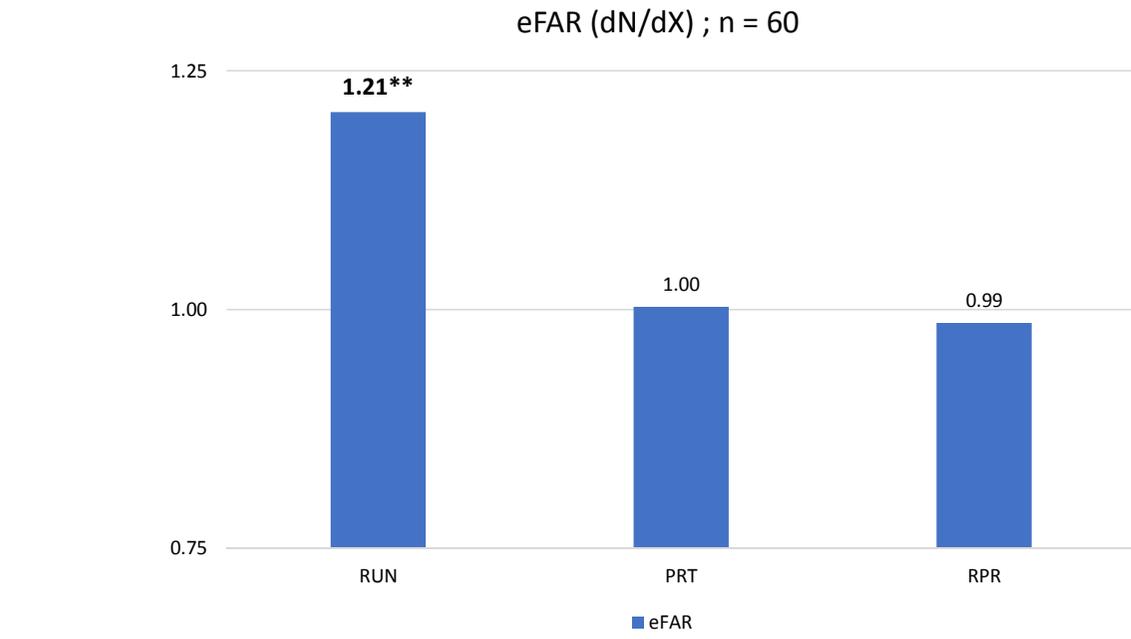
# Fertilisation Azotobactérienne et le P ; → « FAR »

**FERTILISATION AZOTOBACTÉRIENNE RAISONNÉE (FAR) À L'AIDE D'INDICATEURS ET D'ANALYSE MULTICRITÉRIÈRE**  
 PIERRE-PHILIPPE CLAUDE\* (POLYOR SARL, 54000 NANCY)

**LE CONCEPT.** La FAR est une alternative à la méthode du bilan (Comifer) de calcul des doses prévisionnelles d'engrais N (dX). Des indicateurs élémentaires (IAPC, dAM, etc.), brevetés pour la plupart (EP ; Figure 1), de l'efficacité de l'azotobactérisation (eAZB) de résidus de culture au sol sont dérivés de données pédoclimatiques existantes et intégrés par évaluation multicritère en un seul indicateur agrégé d'eAZB, IAZB™ (EP17196251.7). Tenant compte de l'objectif de rendement (pRDT), dN calculée selon l'équation  $dN = a \times pRDT - pAZB$  est dégressive selon eAZB (Figure 2) en raison de la réduction du besoin unitaire en N (a ; Figure 3) et de la contribution en N des azotobactéries (pAZB ; Figure 4). Ce mode de calcul de dN a été appliqué à 30 situations agronomiques en blé afin de comparer la pertinence et la précision de dX et dN.

**MODÉLISATION STICS™ DE dX ET dN**  
 dX (méthode du bilan) et dN (FAR) ont été modélisées pour 30 pédoclimats (France) avec blé d'hiver. Outre le taux de fertilisation moyen (168uN et 186uN), les itinéraires techniques sont identiques pour dX et dN. Les rendements agronomiques (RDT ; Qx/ha) et protéiques (RDN ; uN), bien que visiblement ici assez faibles, sont plus déterminés par dN que par dX (t6R² ; Figure 5). Malgré les RDT plus importants avec dN, leurs teneurs en protéines sont significativement (L.Tes) augmentées (Figure 6) ; idem pour leurs rendements unitaires (RUN ; Figure 7). De plus, bien qu'en moyenne supérieure à dX, dN ne semble pas augmenter pas les reliquats d'N\_média (Nm) post-récolte (RPR ; Figure 8). Au contraire, par rapport aux taux de fertilisation (dN ou dX), les RPR avec dN sont plus faibles (Figure 9), en % de dN). LE CALCUL DE dN DANS LE CADRE DE LA FAR, PLUS SIMPLE ET DÉTERMINANT QUE CELUI DE dX, PRÉFÈRE DES AVANTAGES TANT AGRONOMIQUES QU'ENVIRONNEMENTAUX.

\* gérant, Polyoz SARL / 5 allée du Lys Rouge, 54000 NANCY / 06 74 57 70 90 / polyoz.claude@laposte.net

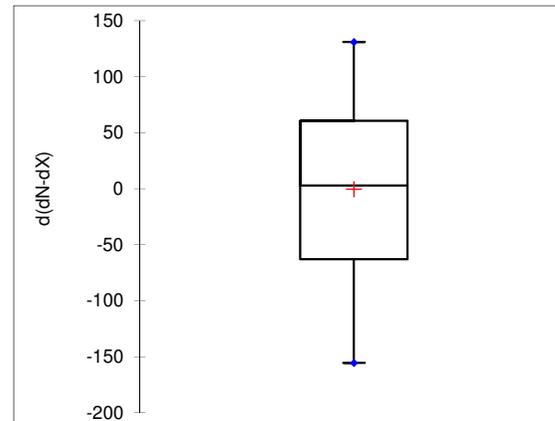
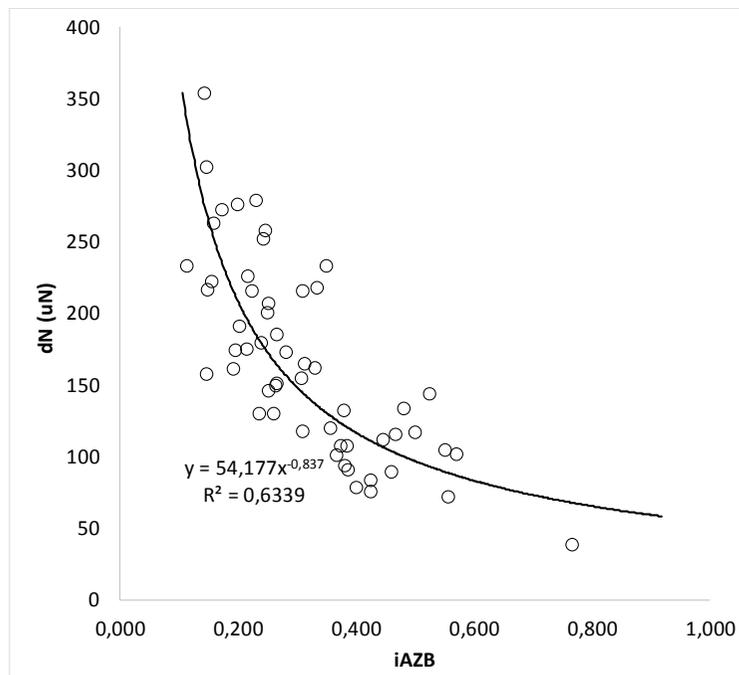


Poster no. 19 / Comifer, Nantes 2017 (Nb. n = 30)

# Fertilisation Azotobactérienne et le P ; → « FAR »

- Indicateurs élémentaires (iÉ) → indicateur agrégé (iAZB)
- iAZB → eAZB (efficacité de la fertilisation azotobactérienne)
- eAZB → dN (dose prévisionnelles d'engrais N)
  
- La FAR intégrant ces notions de iÉ, iAZB et eAZB sera explicité lors de la présentation Polyor au groupe NS
- D'ici là, voir aussi en annexe le document que j'ai préparé reprenant l'essentiel du susdit poster Polyor

# Fertilisation Azotobactérienne ; → « dN »



Statistique	d(dN-dX)
Nb. d'observations	60
Minimum	-155
Maximum	131
1er Quartile	-63
Médiane	3
3ème Quartile	60
Moyenne	0
Ecart-type (n-1)	69
<b>Borne inf. de la moyenne (95%)</b>	<b>-19</b>
<b>Borne sup. de la moyenne (95%)</b>	<b>19</b>

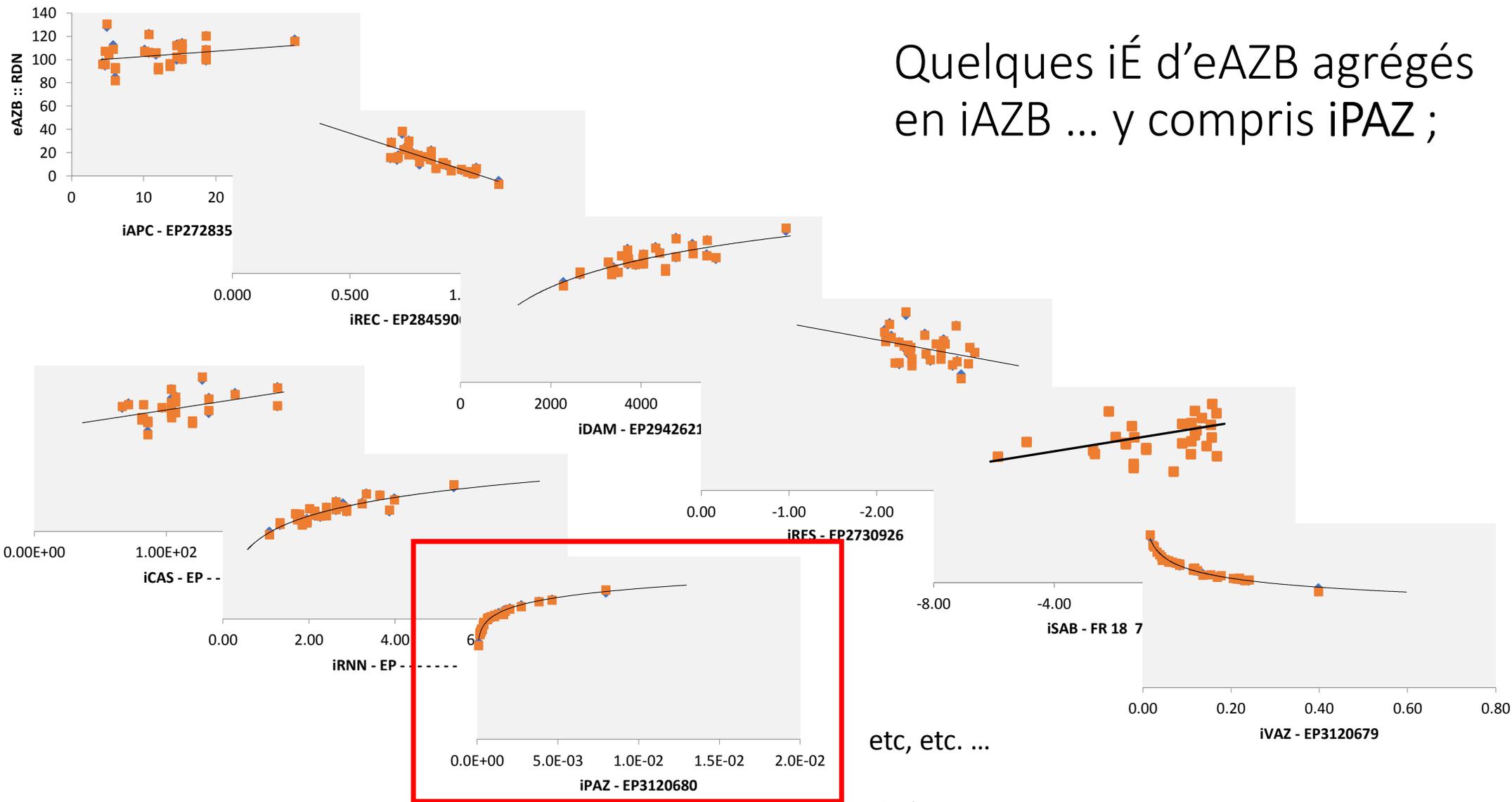
... la moitié des dN sont *supérieures* à dX

... à comparer avec le susdit « rationnement » de dX

... dN = dX +/- 60uN, mais plus généralement +/- 20uN

... cf. présentation Polyor au groupe NS le \_\_\_ ? \_\_\_

Quelques iÉ d'eAZB agrégés  
en iAZB ... y compris iPAZ ;



etc, etc. ...