

Phosphore, arsenic et silicium en culture de céréales : éléments minéraux désirés ou indésirables...

Animatrices :

Fabienne TROLARD et Claude PLASSARD (section 5)

Marie Emmanuelle SAINT-MACARY et Delphine GUEY (section 9)

INTRODUCTION

Fabienne TROLARD et Delphine GUEY
avec le concours de Clément FONTAINE de la société Eurofins

La nutrition minérale = ensemble des mécanismes de **transport**, de **stockage** et de **réactions** des ions minéraux impliqués dans le **métabolisme**, la **croissance** et la **reproduction** des êtres vivants.



+

Ensemble des microorganismes vivants en communauté complexe, constituée principalement de bactéries mais aussi d'archées, de champignons et de virus



structure du vivant



e.t. essentiels



e.t. indispensables pour certains organismes

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

PÉRIODE	GROUPE																		GAZ RARES	
	IA																		VIIA	
1	1,00794 1 H 2,012 2 He																		2,016 2 He	
2	3,037 3 Li 4,0026 4 Be																			

 20,180 9 Ne | || 3 | 6,941 6 Na 7,016 7 Mg | | | | | | | | | | | | | | | | | | 39,948 18 Ar | |
4	19,00 19 K 20,18 20 Ca																		79,904 36 Kr	
5	39,0983 39 Rb 40,078 40 Sr																		131,29 54 Xe	
6	85,4678 85 Cs 87,62 88 Ba																		222,0186 86 Rn	
7	132,9054519 133 Fr 137,07 138 Ra																		222,0186 86 Rn	

NUMÉRO ATOMIQUE (1)

POINT D'ÉBULLITION (°C)

POINT DE FUSION (°C)

MASSE VOLUMIQUE (g/cm³) (1) (1)

STRUCTURE ÉLECTRONIQUE

4

9,0122

Be

DEGRÉS D'OXYDATION

SYMBOLE (3)

NOM

Beryllium

LÉGENDE

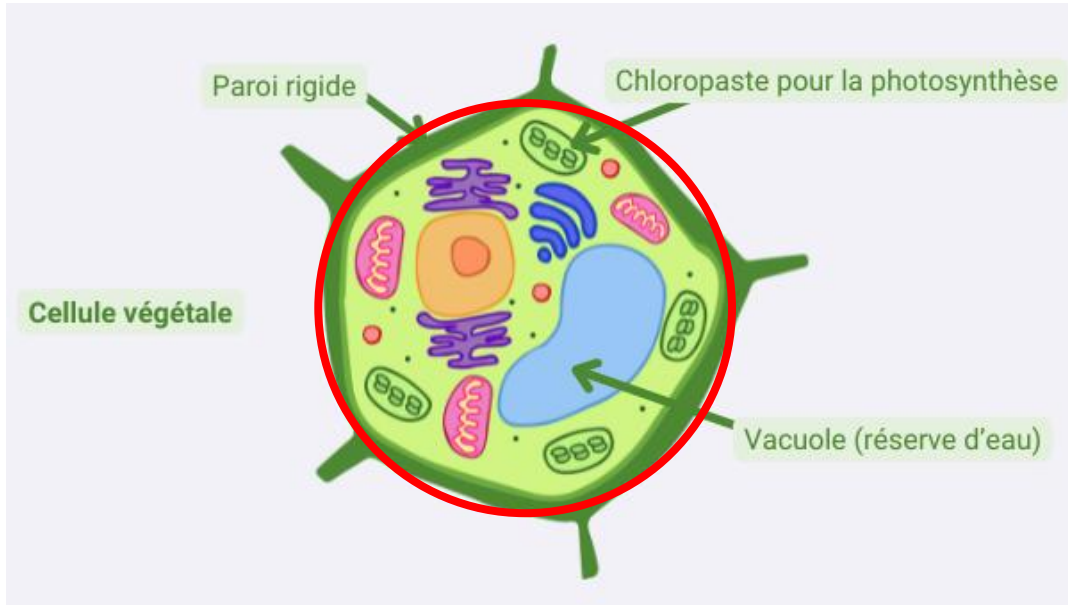
Notes : (1) Les valeurs données pour les éléments gazeux correspondent à la densité du liquide au point d'ébullition.
 (2) Basé sur le ¹²C ; les parenthèses () indiquent l'isotope le plus stable ou le plus répandu.
 (3) Noir = solide ; rouge = gaz ; gris = liquide ; éclairé = préparé par synthèse.
 (4) Proposé, mais non accepté officiellement.

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Cependant...

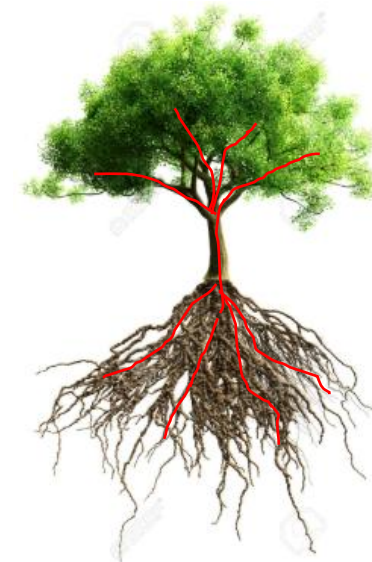
Pour les plantes un paradoxe thermodynamique

Si la forme énergétiquement la plus stable est la sphère



Dans des milieux dilués, le besoin d'éléments nutritifs pour entretenir les déséquilibres thermodynamiques moteurs du vivant

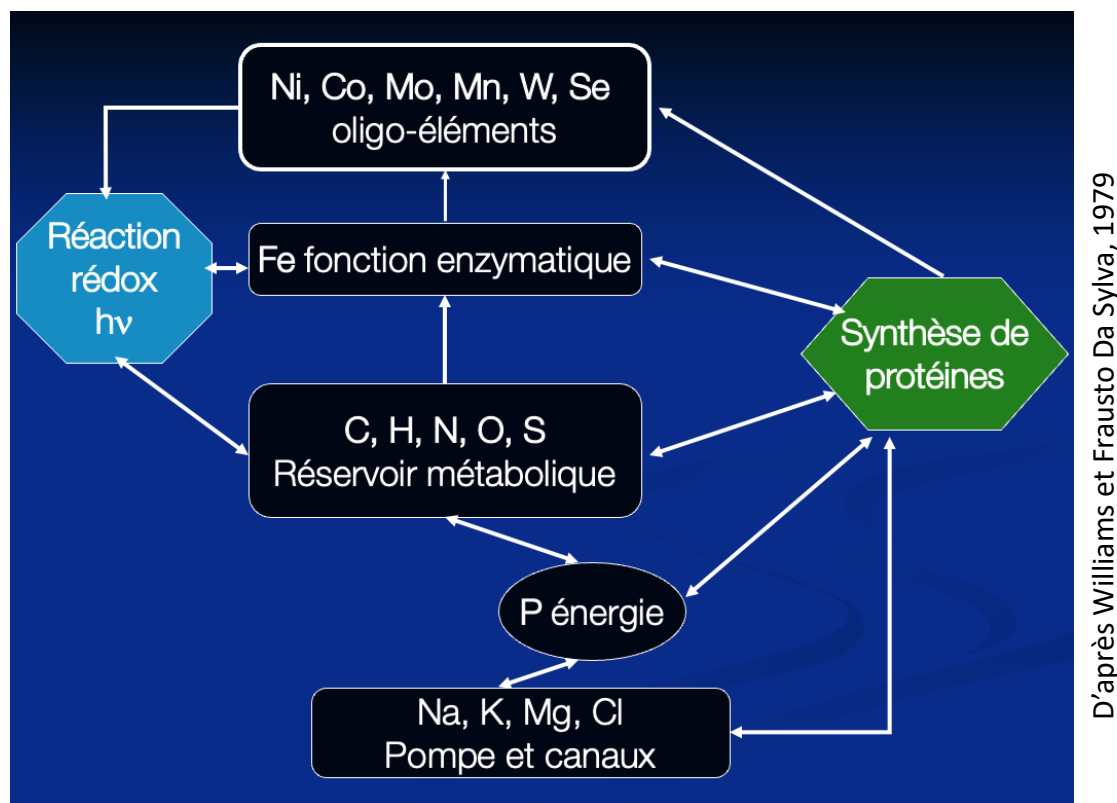
>>> Architecture des organismes



Plante = Organismes immobiles >> ramification

Les éléments nutritifs dans la plante ...

Un **minimum de 17 éléments** dans les **interrelations cinétiques coopératives** entre tous les compartiments, éléments et composés **d'une même cellule**



Photosynthèse : 7 éléments minéraux essentiels (Zn, N, Mg, K, Fe, S et P)

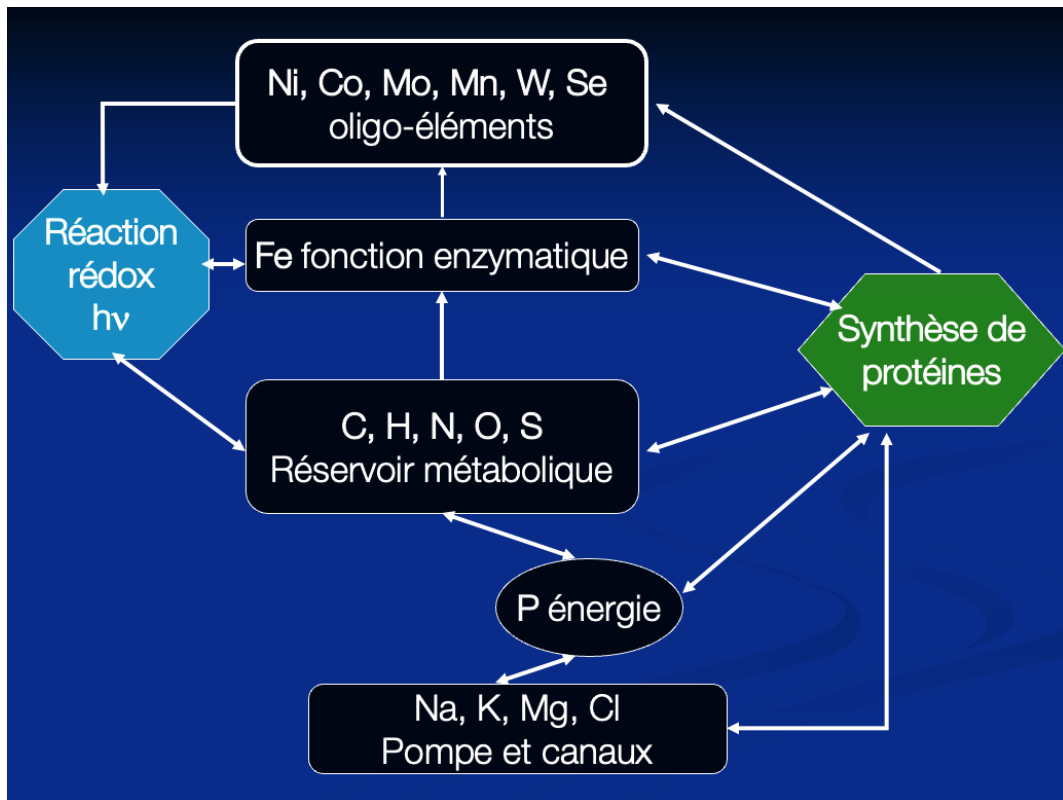
Synthèse des protéines : le Mo est essentiel dans la réduction du nitrate

Fructification : Cu, Cl, B, et surtout K variable au cours de développement végétal

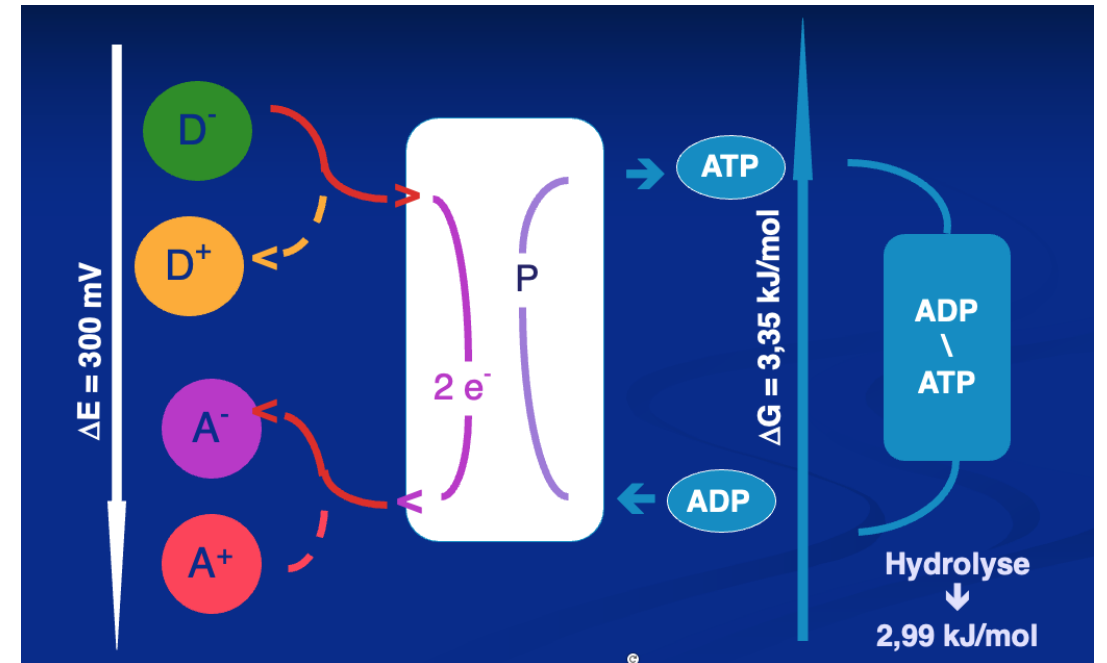
L'immunité : Si régulateur de stress, Ca et B.

... et une réaction essentielle productrice d'énergie

Un minimum de **17 éléments dans les interrelations cinétiques coopératives** entre tous les compartiments, éléments et composés **d'une même cellule**



La phosphorylation oxydative



Le système qui permet à la cellule de disposer d'une **réserve d'énergie, disponible et à usage non exclusif**

Les métalloïdes

1 H																	18 He
3 Li	4 Be											13 B	14 C	15 N	16 O	17 F	18 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Des caractéristiques comme les non-métaux

Formation d'anions

Liaisons covalentes lorsqu'ils réagissent avec d'autres non-métaux.

Matériau cassant

Les métalloïdes

1 H																	18 He
3 Li	4 Be											13 B	14 C	15 N	16 O	17 F	18 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Des caractéristiques comme les non-métaux

Formation d'anions

Liaisons covalentes lorsqu'ils réagissent avec d'autres non-métaux.

Matériau cassant

Des caractéristiques comme les métaux

Apparence brillante métallique

Les métalloïdes

1 H	2 He																
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Ce	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Des caractéristiques comme les non-métaux

Formation d'anions

Liaisons covalentes lorsqu'ils réagissent avec d'autres non-métaux.

Matériau cassant

Des caractéristiques comme les métaux

Apparence brillante métallique

Des propriétés intermédiaires entre métaux et non-métaux

Multiples états d'oxydation donnant des composés différents selon les conditions rédox du milieu

Une électronégativité plus élevée que les métaux mais moins élevée que celle des non-métaux

Une conductivité électrique moins élevée que les métaux mais plus que les non-métaux

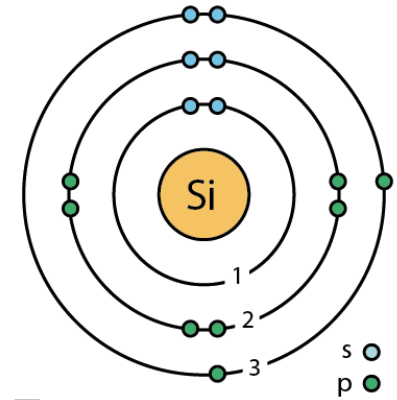
Les éléments examinés dans cette séance

	13	14	15	16	17
5	B	C	N	O	F
13	Al	Si	P	S	Cl
31	Ga	Ge	As	Se	Br
49	In	Sn	Sb	Te	I
81	Tl	Pb	Bi	Po	At

Intérêt agronomique : **Si** et **P**

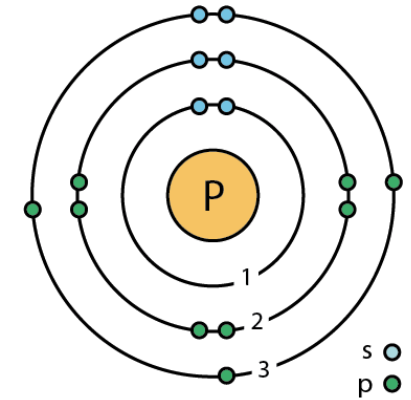
Si

Numéro atomique 14
[Ne] 3s² 3p²



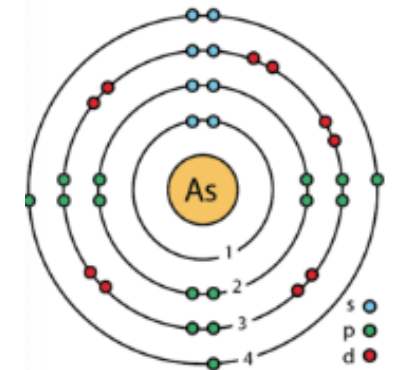
P

Numéro atomique 15
[Ne] 3s² 3p³



As

Numéro atomique 33
[Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p³



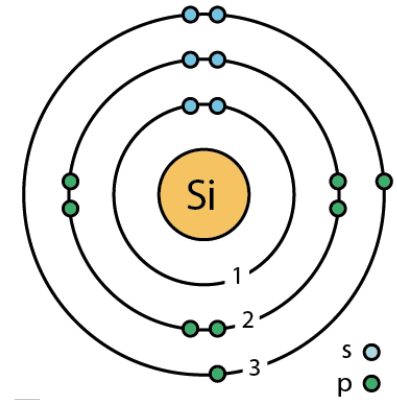
Les éléments examinés dans cette séance

	13	14	15	16	17
5	B	C	N	O	F
13	Al	Si	P	S	Cl
31	Ga	Ge	As	Se	Br
49	In	Sn	Sb	Te	I
81	Tl	Pb	Bi	Po	At

Intérêt agronomique : **Si** et **P**

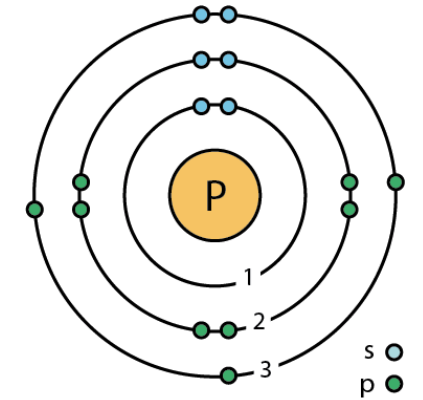
Si

Numéro atomique 14
[Ne] 3s² 3p²



P

Numéro atomique 15
[Ne] 3s² 3p³

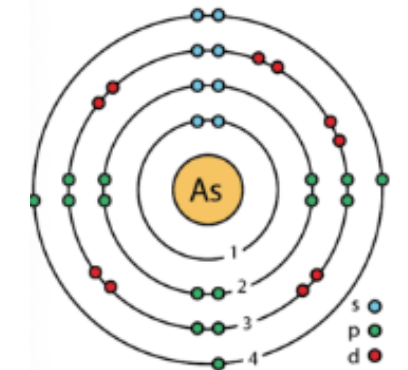


Même environnement externe

As

Numéro atomique 33
[Ar] 3d¹⁰ 4s² 4p³

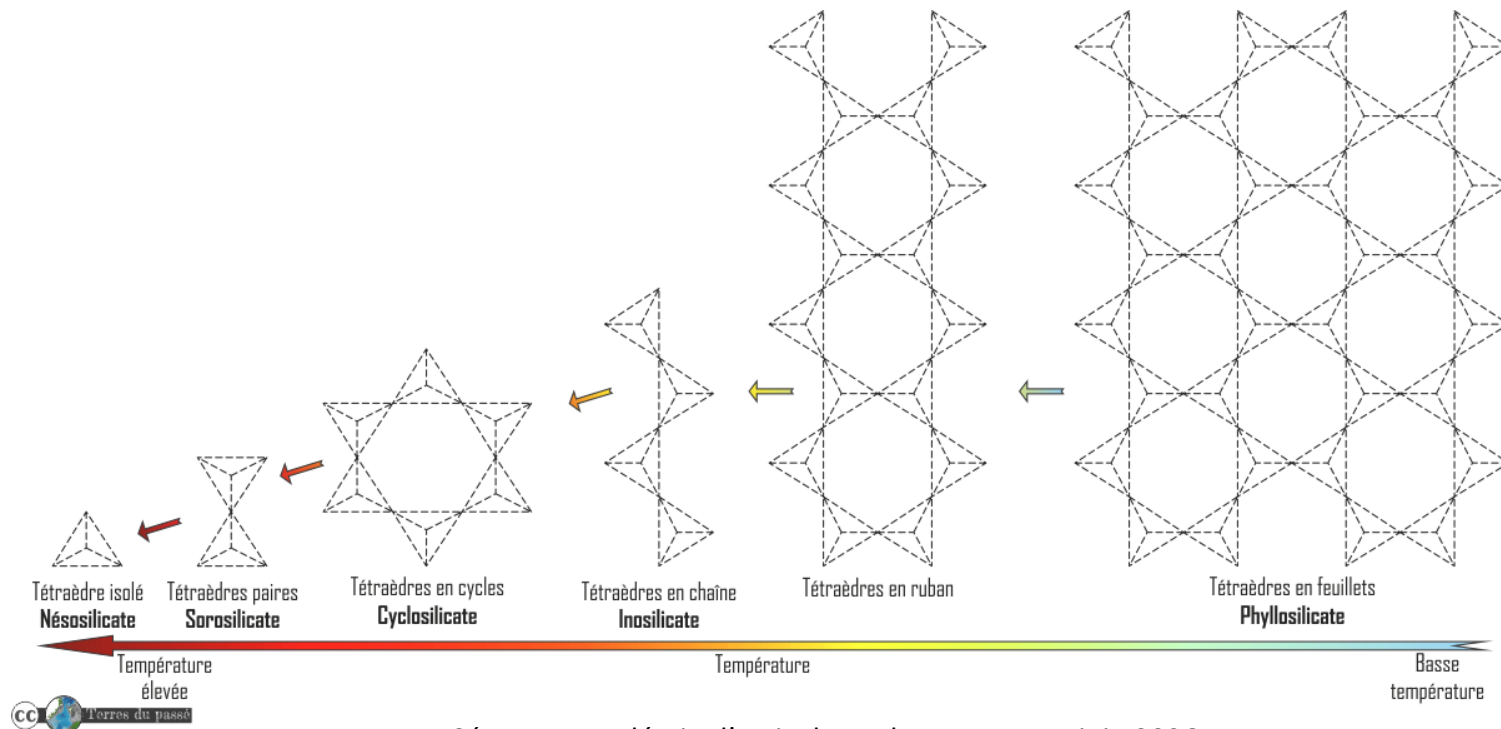
Plusieurs états redox



Teneurs dans les sols : le silicium

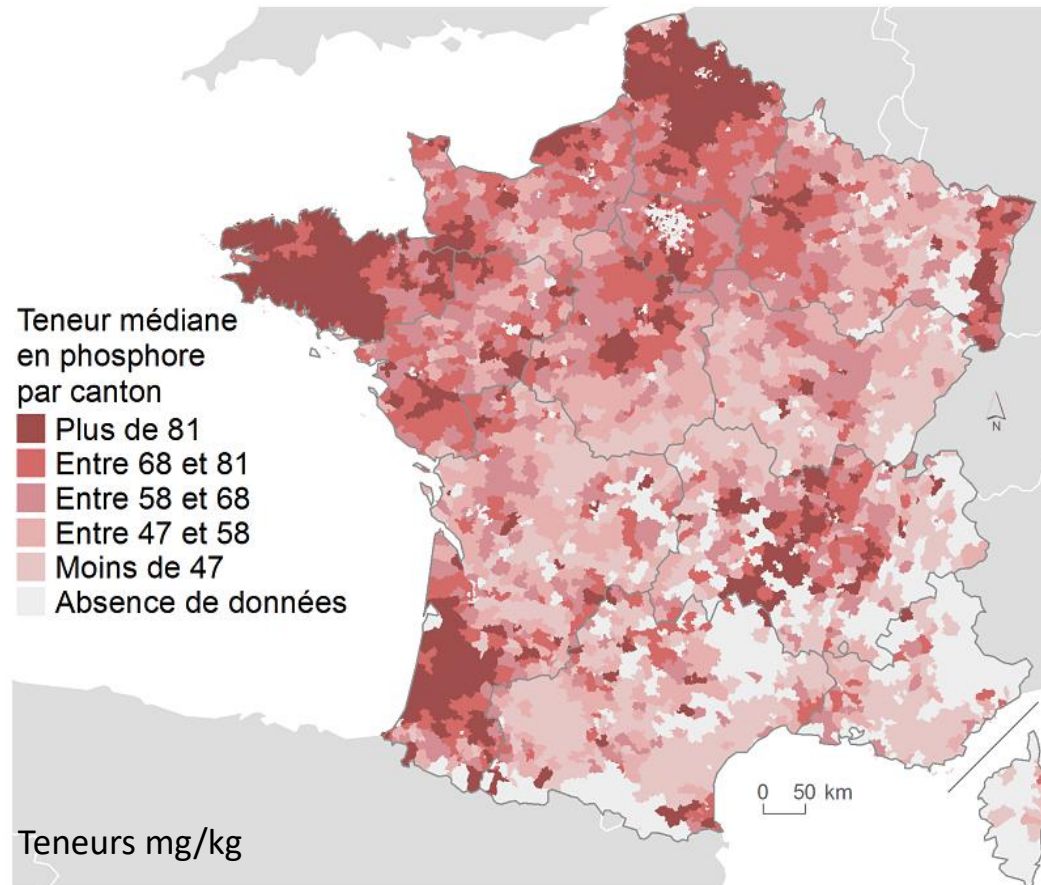
Si est le 3^{ème} élément le plus abondant dans le globe terrestre et le 2^{ème} élément le plus abondant dans la croûte terrestre.

Avec l'oxygène, le silicium forme l'ion tétraédrique $[\text{SiO}_4]^{4-}$, brique élémentaire des minéraux de la très grande famille des silicates.



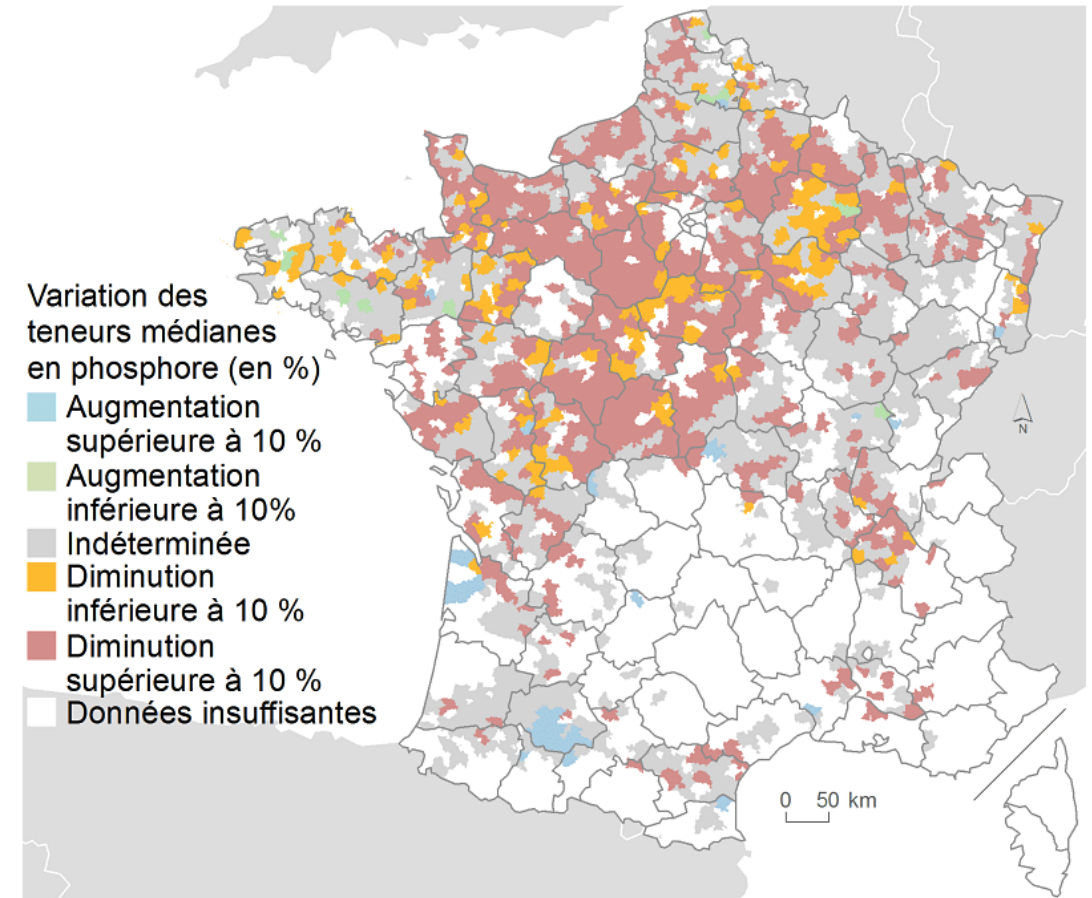
Teneurs dans les sols : le phosphore

Teneurs médianes par canton
sur la période 2010- 2014



Environ 3 millions d'analyses par décade

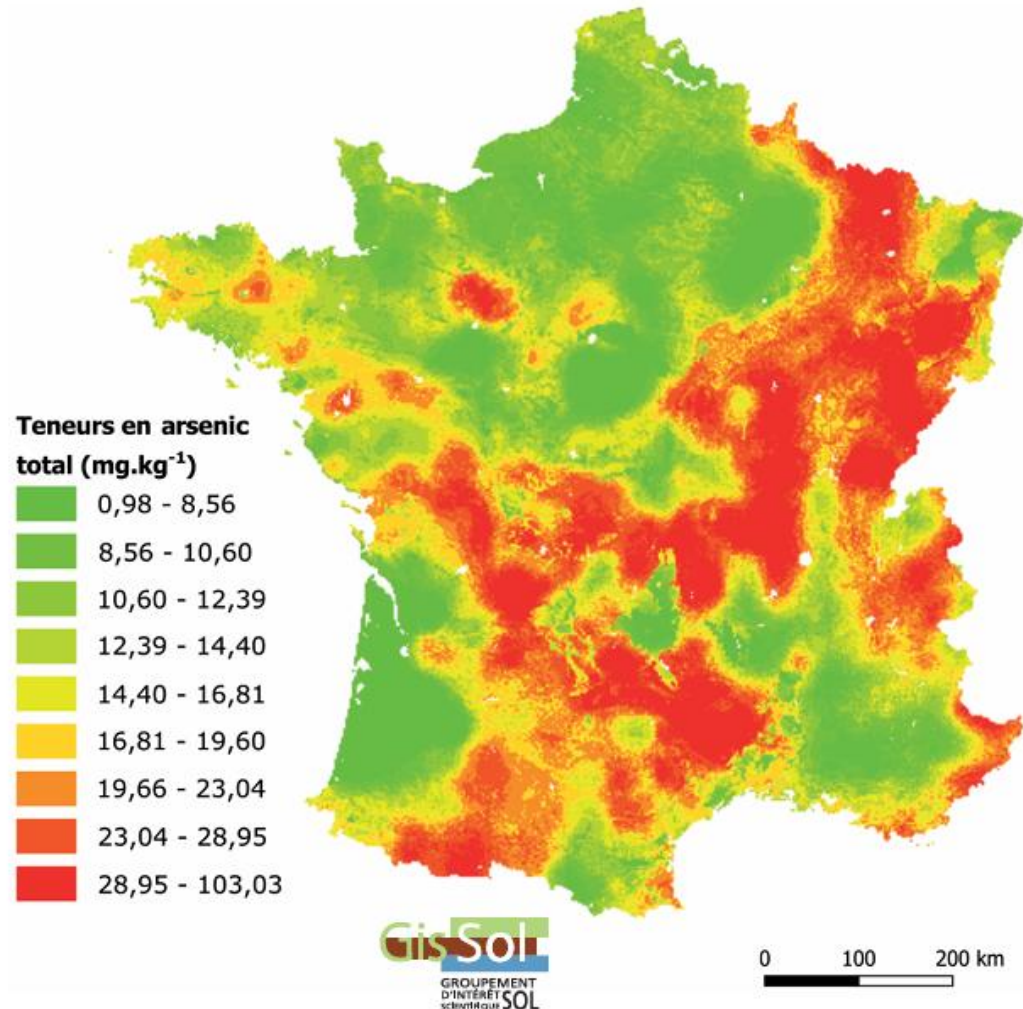
Variation des teneurs entre
les périodes 1994-2004 et 2005-2014



Source : <https://www.notre-environnement.gouv.fr/> (CGDD, 2025)

Teneurs dans les sols : l'arsenic

Teneurs prédites en arsenic total des horizons de surface (0-30 cm) des sols en France.



Source : Gis Sol, 2019

Sources naturelles

Érosion des sols et des roches

Sources anthropiques

Utilisation ancienne de certains pesticides (vignes et vergers)

Impuretés dans certains engrais minéraux

Industrie

Mines

Mesures des sites du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), première campagne (environ **3 000 points**), et spatialisation à l'aide d'un **algorithme géostatistique** robuste, les estimations spatialisées des teneurs en arsenic total dans l'horizon de surface (0-30 cm) à une résolution de 1000 m.

Source : GisSol, 2019

Eurofins Galys

Pour une agriculture profitable et durable

Phosphore, Arsenic et Silicium en culture de céréales : éléments minéraux désirés ou indésirables....

Académie d'Agriculture de France



Intervenant : Clément FONTAINE,
Responsable Recherche, Développement & Innovation
Expert Agronomie Grandes cultures / Physiologie végétale / Data traitement
Laboratoire Eurofins Galys – Eurofins Agro Testing



ACADÉMIE
D'AGRICULTURE
DE FRANCE

comifer

Comité Français d'Étude et de Développement
de la Fertilisation Raisonnée


Gemmas

Les analyses de terre en France

Les acteurs principaux :



Galys



Les analyses de terre en France

Les acteurs principaux :



Galys



Les analyses de base :

Granulométrie 5 fractions

pH eau et KCl, Calcaire, Calcaire Actif

Corg, Ntot, APM, POxC

CEC Metson

Elements majeurs : P_2O_5 Olsen, K_2O , MgO , CaO

Oligos-éléments : EDTA (Cu, Zn, Mn, Fe) , B



Les analyses de terre en France

Environ 250 000 analyses de terre sont réalisées
chaque année en France.

Les acteurs principaux :



Galys



Les analyses de base :

Granulométrie 5 fractions

pH eau et KCl, Calcaire total, Calcaire Actif

Corg, Ntot, APM, POxC

CEC Metson

Elements majeurs : P_2O_5 Olsen, K_2O , MgO , CaO

Oligos-éléments : EDTA (Cu, Zn, Mn, Fe) , B



Les analyses de terre en France

Le cas du Phosphore

Les méthodes normées et utilisées en France :

Méthode Olsen : Phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

NF ISO 11263

Méthode prédominante

Méthode Joret-Hébert : phosphore soluble dans une solution d'oxalate d'ammonium.

NF X 31-161

Méthode encore régulière en Viti/Arbo

Méthode Dyer : phosphore soluble dans une solution à 20 g/l d'acide citrique monohydraté.

NF X 31-160

Tombée en désuétude

Les analyses de terre en France

Le cas du Phosphore

Les méthodes normées et utilisées dans les autres pays :

Méthode Olsen : Phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

NF ISO 11263

Méthode prédominante Très répandue en Asie

Méthode Mehlich-3 : phosphore soluble dans une solution Acide acétique, Nitrate d'ammonium, Fluorure d'ammonium, Acide nitrique, EDTA.

AOAC Official Method 2002.03 (Soluble Phosphorus and Potassium in Soils, Mehlich 3 Extraction Method)

Méthode Très employée aux Amériques

Méthode CaCl_2 : phosphore soluble dans une solution de chlorure de calcium.

NF EN 13651

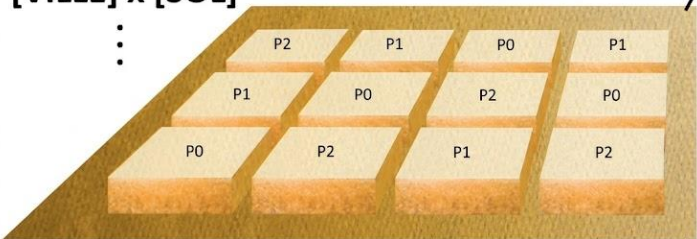
Méthode très employée en Europe

Les analyses de terre en France

Le cas du Phosphore

[VILLE] x [SOL]

⋮



Année 1 : blé

Année 2 : orge

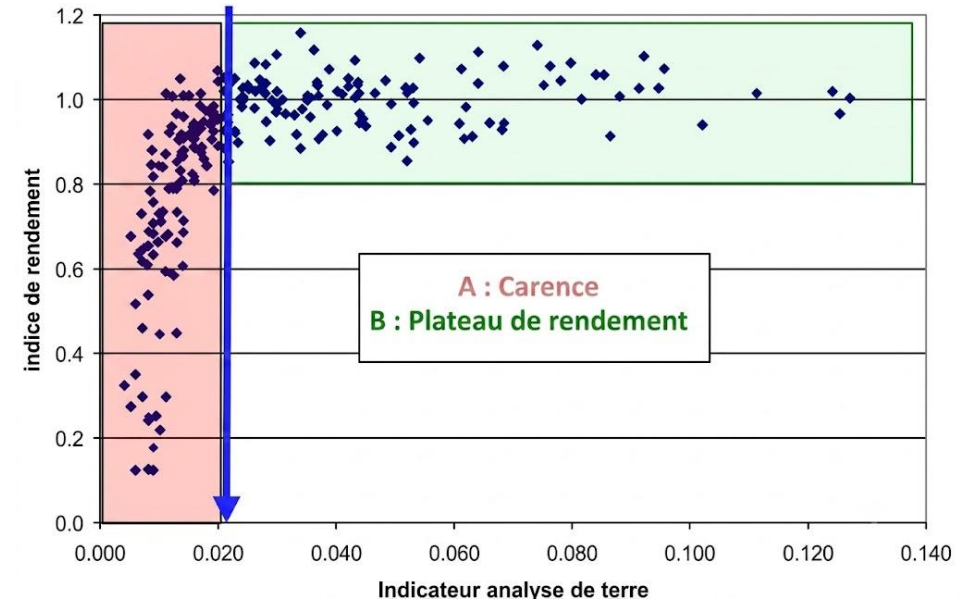
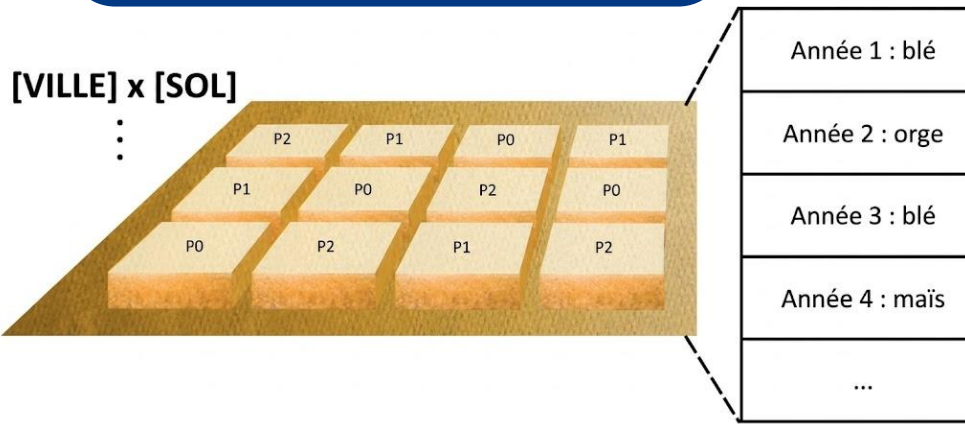
Année 3 : blé

Année 4 : maïs

...

Les analyses de terre en France

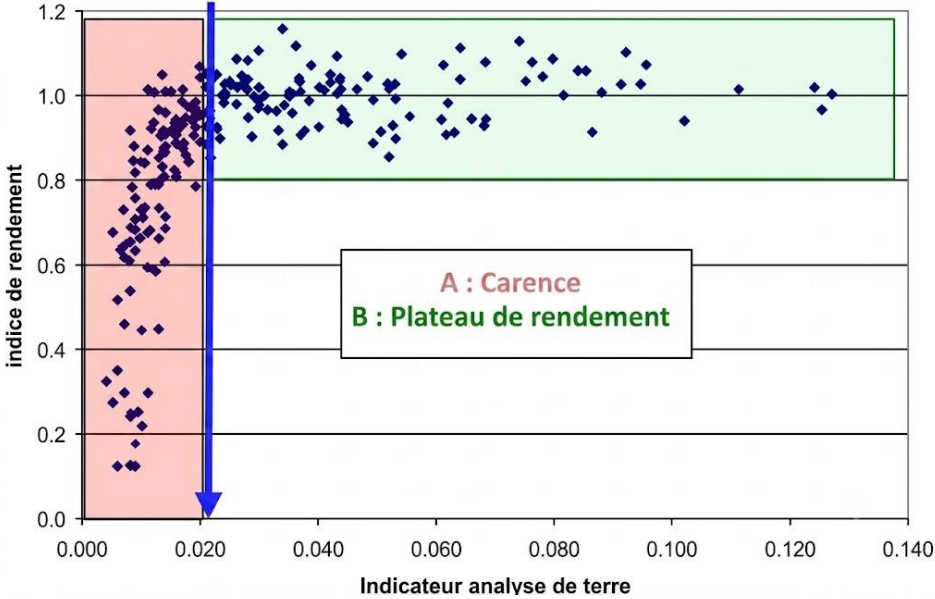
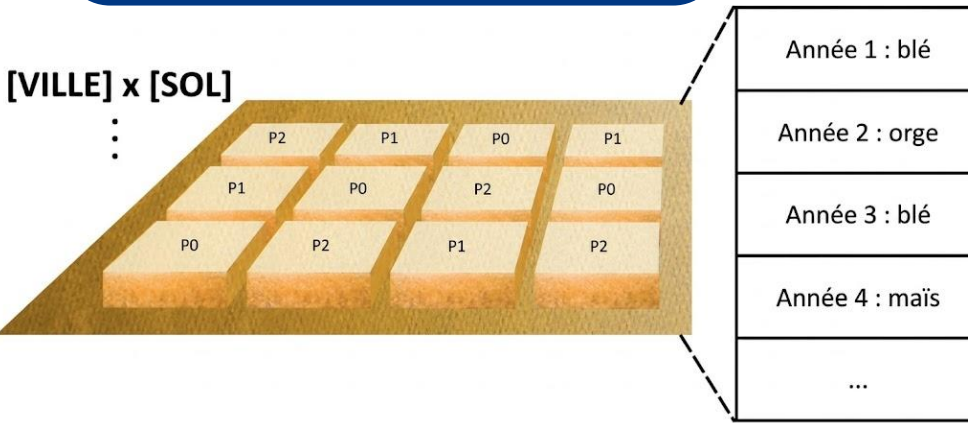
Le cas du Phosphore



Obtention d'une valeur de Pseuil par : site x culture
=
320 Pseuil (320 essais "valides")

Les analyses de terre en France

Le cas du Phosphore



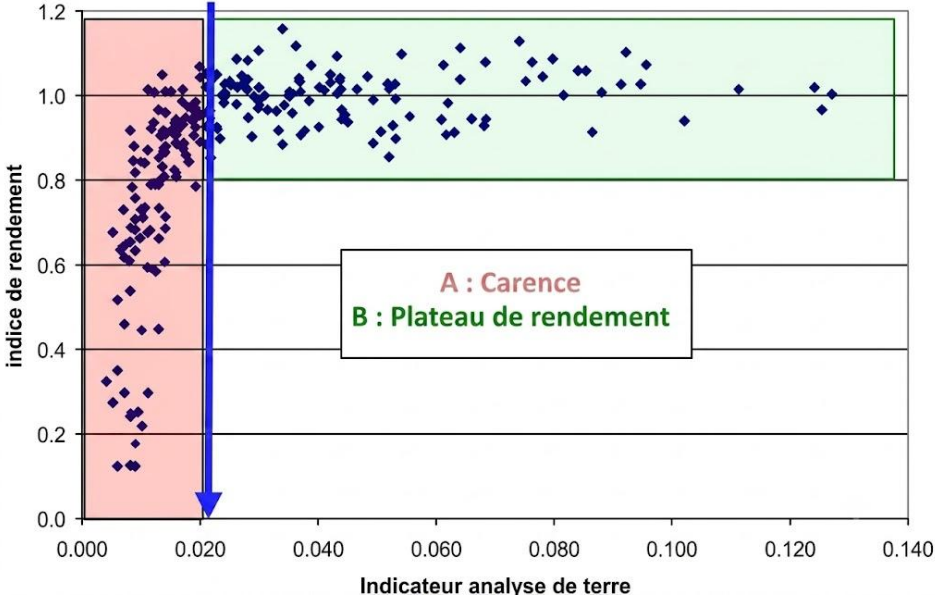
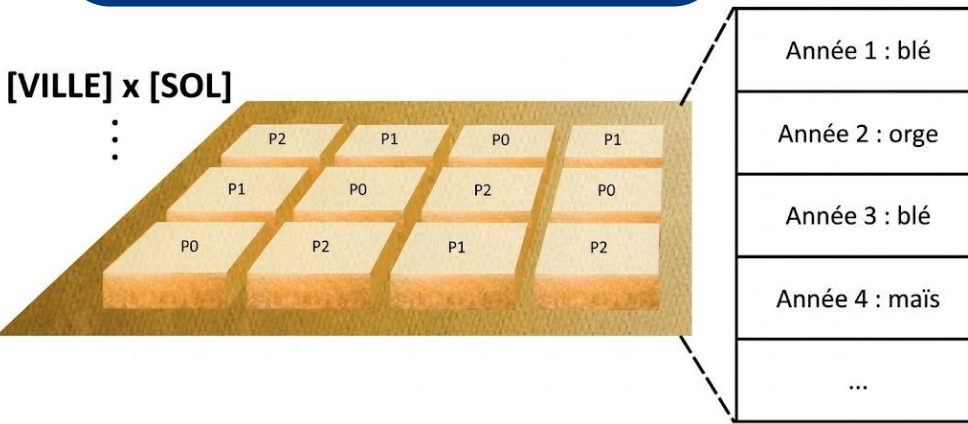
Obtention d'une valeur de Pseuil par : site x culture
=
320 Pseuil (320 essais "valides")

Type sol revu	Sensibilité culture	Médiane	Moyenne	Ecart-type ET	Moyenne + ET	Approx seuil actuel
Argilo-calcicole	SE	51.6	55.8	29.9	85.7	90
Argilo-calcicole	SF	35.3	41.8	26.9	68.7	80
Craie	SE	50.8	71.7	53	124.7	180
Craie	SF	122.8	99.4	57	156.4	135
Limon-argile	SE	66.6	43.6	24.9	68.5	80
Limon-argile	SF	75	44	25.5	69.5	70
Sable	SF	69	67.6	32.9	100.5	80

Forte variabilité intra-classe

Les analyses de terre en France

Le cas du Phosphore



Obtention d'une valeur de Pseuil par : site x culture
=
320 Pseuil (320 essais "valides")

Comment expliquer la variabilité
des seuils d'impasse ?

Type sol revu	Sensibilité culture	Médiane	Moyenne	Ecart-type ET	Moyenne + ET	Approx seuil actuel
Argilo-calcicole	SE	51.6	55.8	29.9	85.7	90
Argilo-calcicole	SF	35.3	41.8	26.9	68.7	80
Craie	SE	50.8	71.7	53	124.7	180
Craie	SF	122.8	99.4	57	156.4	135
Limon-argile	SE	66.6	43.6	24.9	68.5	80
Limon-argile	SF	75	44	25.5	69.5	70
Sable	SF	69	67.6	32.9	100.5	80

Forte variabilité intra-classe

Les analyses de terre en France

Le cas de l'arsenic

Les méthodes normées et utilisées en France :

Méthode de dosage à l'eau régale : mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique

Norme NF EN ISO 12914 (par micro-ondes) et NF EN ISO 11466 (par chauffage à reflux)

Méthodes prédominantes

Les analyses de terre en France

Le cas de l'arsenic

Les méthodes normées et utilisées dans les autres pays :

Méthode EDTA : Phosphore soluble dans une solution d'acide nitrique et d'EDTA.

Norme ISO 25251

Méthode prédominante Très répandue en Europe.

Couplée à une analyse LC-ICP-MS, permet de distinguer les formes As(III) et As(V) → forme confusante au PO_4^{3-} pour les plantes.

Méthode Olsen : Arsenic soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

Dérivée de NF ISO 11263

Méthode Occasionnelle rencontrée dans le monde.

Méthode CaCl_2 : phosphore soluble dans une solution de chlorure de calcium.

Dérivée de ISO 14255

Méthode très employée en Europe du Nord

Les analyses de terre en France

Le cas de l'arsenic

L'arsenic n'est pas un nutriment : jamais dosé dans une analyse de terre "fertilité" standard

Il est en revanche un **élément trace métallique (ETM)** suivi dans des contextes très spécifiques : épandage de matières organiques, sites et sols pollués, ICPE

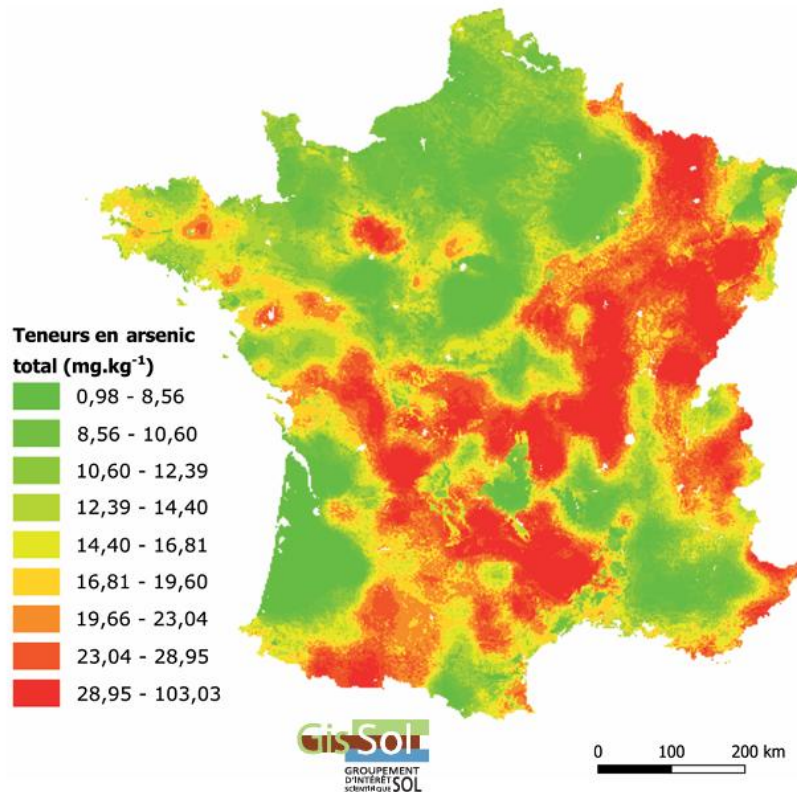
- **Arrêté du 8 janvier 1998** (épandage des boues sur sols agricoles, pris en application du décret n°97-1133 du 8/12/1997) : fixe les teneurs limites en ETM dans les boues *et* dans les sols récepteurs

Les analyses de terre en France et la réglementation

Le cas de l'arsenic

L'arsenic n'est pas un nutriment : jamais dosé dans une analyse de terre "fertilité" standard

Teneurs prédites en arsenic total des horizons de surface (0-30 cm) des sols en France.



Source : Gis Sol, 2019

Il est en revanche un **élément trace métallique (ETM)** suivi dans des contextes très spécifiques : épandage de matières organiques, sites et sols pollués, ICPE

- **Arrêté du 8 janvier 1998** (épandage des boues sur sols agricoles, pris en application du décret n°97-1133 du 8/12/1997) : fixe les teneurs limites en ETM dans les boues et dans les sols récepteurs

- **Les 8 ETM historiquement réglementés** : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn

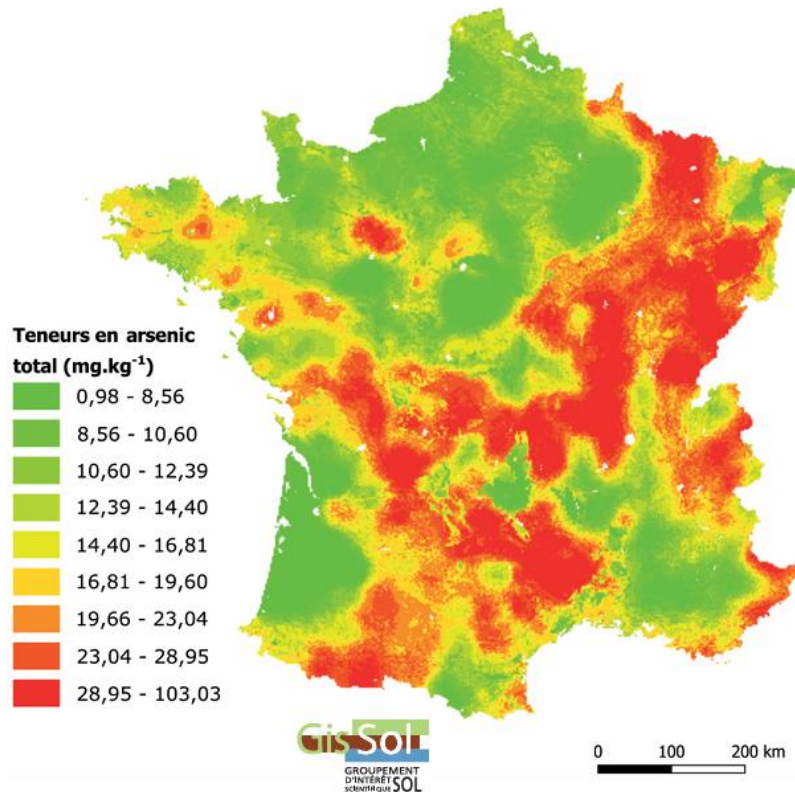
- **L'arsenic n'en fait pas partie** — c'est un point à souligner : un métalloïde naturellement présent, parfois en forte hétérogénéité géochimique, mais hors du cadre réglementaire historique de l'épandage

Les analyses de terre en France et la réglementation

Le cas de l'arsenic

L'arsenic n'est pas un nutriment : jamais dosé dans une analyse de terre "fertilité" standard

Teneurs prédites en arsenic total des horizons de surface (0-30 cm) des sols en France.



Source : Gis Sol, 2019

Il est en revanche un **élément trace métallique (ETM)** suivi dans des contextes très spécifiques : épandage de matières organiques, sites et sols pollués, ICPE

• **Arrêté du 8 janvier 1998** (épandage des boues sur sols agricoles, pris en application du décret n°97-1133 du 8/12/1997) : fixe les teneurs limites en ETM dans les boues et dans les sols récepteurs **Attente du socle commun sur ce sujet**

• **Les 8 ETM historiquement réglementés** : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn

• **L'arsenic n'en fait pas partie** — c'est un point à souligner : un métalloïde naturellement présent, parfois en forte hétérogénéité géochimique, mais hors du cadre réglementaire historique de l'épandage

Les analyses de terre en France et la réglementation

Le cas de l'arsenic

Tableau 6 : Proposition de VASAU pour l'agriculture urbaine en Île-de-France

Polluants	VASAU 1 (mg/kg)	VASAU 2 (mg/kg)
Pb	53,7 ^a	100 ^c
Cd	0,51 ^a	1,0 ^d
Hg	0,32 ^a	0,64 ^d
Cu	28,0 ^a	84,0 ^d
Zn	88,0 ^a	264,0 ^d
As	12,0 ^b	20 ^b
Ni	31,2 ^a	62,4 ^d
Se	0,31 ^a	0,62 ^d
Cr	65,2 ^a	130,4 ^d

A défaut, des références locales

Les seuils sanitaires existants (hors champ agronomique)

• **Avis du HCSP (Haut Conseil de la Santé Publique), 30 août 2022** — gestion sanitaire de l'arsenic dans les sols :

- Le HCSP précise explicitement que des "valeurs repères" agronomiques nationales ne sont *pas pertinentes* en l'état (scénarios excluraient jusqu'à 90% des sols français)

En l'absence de seuil national pour les sols agricoles, certaines régions produisent leurs propres valeurs repères (ex. guide **REFUGE**, Île-de-France, pour 9 ETM dont As)

Les analyses de terre en France

Le cas de l'arsenic

Tableau 6 : Proposition de VASAU pour l'agriculture urbaine en Île-de-France

Polluants	VASAU 1 (mg/kg)	VASAU 2 (mg/kg)
Pb	53,7 ^a	100 ^c
Cd	0,51 ^a	1,0 ^d
Hg	0,32 ^a	0,64 ^d
Cu	28,0 ^a	84,0 ^d
Zn	88,0 ^a	264,0 ^d
As	12,0 ^b	20 ^b
Ni	31,2 ^a	62,4 ^d
Se	0,31 ^a	0,62 ^d
Cr	65,2 ^a	130,4 ^d

A défaut, des références locales

Les seuils sanitaires existants (hors champ agronomique)

• **Avis du HCSP (Haut Conseil de la Santé Publique), 30 août 2022** — gestion sanitaire de l'arsenic dans les sols :

- Le HCSP précise explicitement que des "valeurs repères" agronomiques nationales ne sont *pas pertinentes* en l'état (scénarios excluraient jusqu'à 90% des sols français)

En l'absence de seuil national pour les sols agricoles, certaines régions produisent leurs propres valeurs repères (ex. guide **REFUGE**, Île-de-France, pour 9 ETM dont As)

Les analyses de terre en France

Le cas de l'arsenic



Les MFSC

NF U 44-095 : Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.

NF U 44-051 : Amendements organiques - Dénominations spécifications et marquage.

Limite fixée à 18 mg d'As / kg de MS

MAJ du socle commun ?

Les analyses de terre en France

Le cas du silicium

Les méthodes normées et utilisées en France :

Méthode de dosage Si total: attaque par un mélange HF / HNO₃ / HCl

Norme NF EN ISO 16967 (par micro-ondes)

Les analyses de terre en France

Le cas du silicium

Les méthodes normées et utilisées dans les autres pays :

Méthode CaCl_2 : Silicium soluble dans une solution de chlorure de calcium.

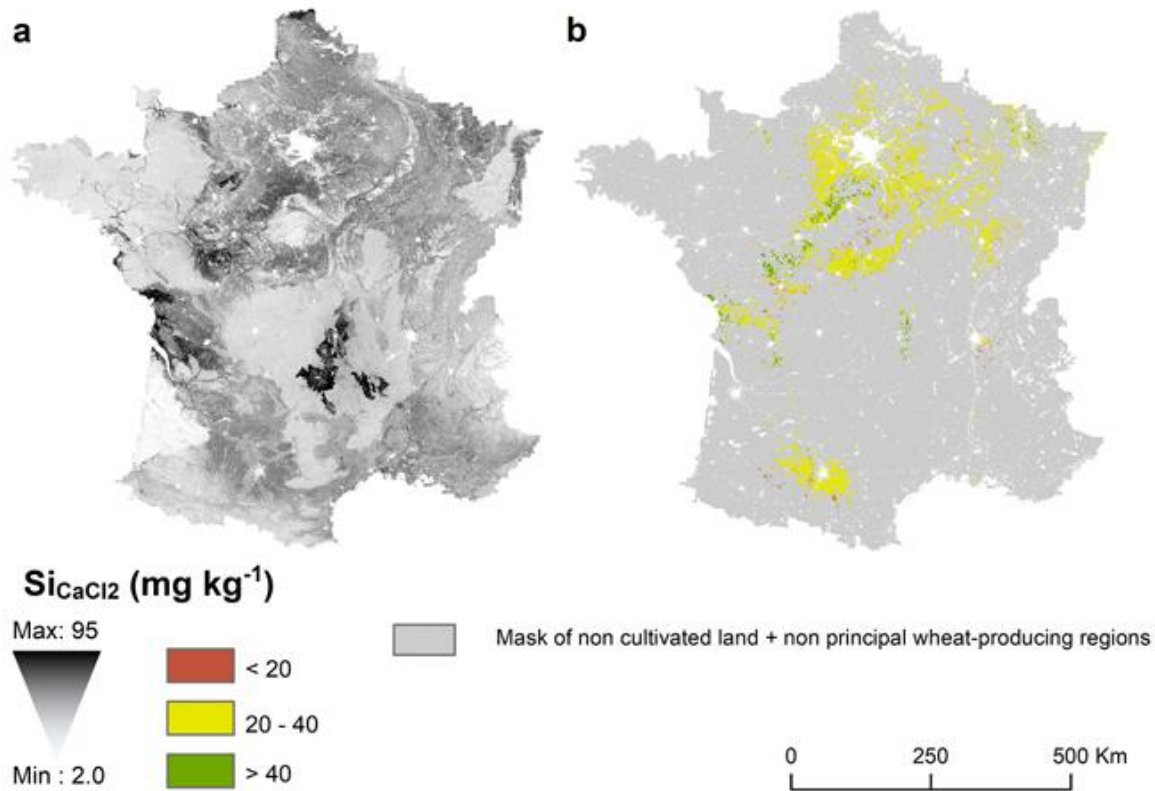
Dérivée de ISO 14255

Méthode très employée en Europe du Nord

Les analyses de terre en France

Le cas du silicium

Le Si , un élément non essentiel mais bénéfique



Le Si n'est **pas classé élément essentiel** pour les plantes, mais a été ajouté en **2015** par l'**International Plant Nutrition Institute (IPNI)** à la liste des éléments "**bénéfiques**", sur la base d'évidences scientifiques solides (protection contre stress biotiques et abiotiques)

Une seule méthode de dosage du Si "biodisponible" standardisée en routine.

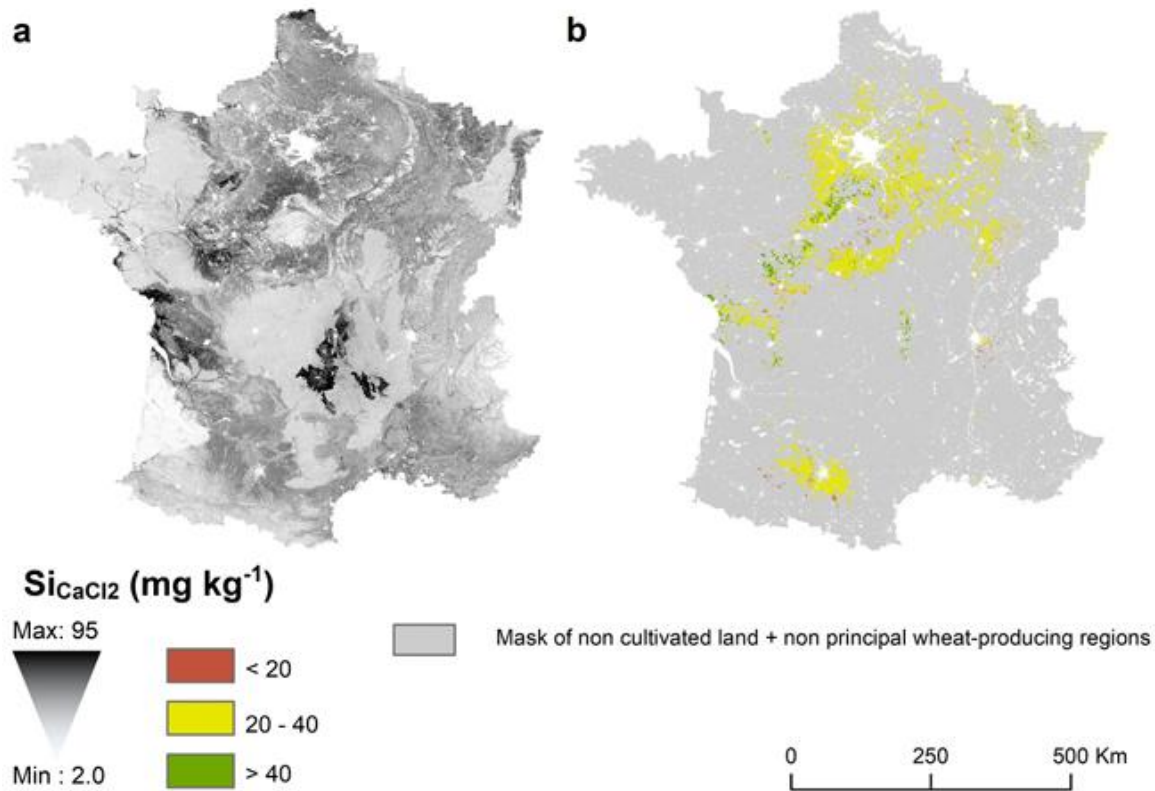
Extraction du Si au CaCl_2

M. Caubet et al. 2020 ; Agriculture increases the bioavailability of silicon, a beneficial element for crop, in temperate soils

Les analyses de terre en France

Le cas du silicium

Le Si , un élément non essentiel mais bénéfique



Le Si n'est **pas classé élément essentiel** pour les plantes, mais a été ajouté en **2015** par l'**International Plant Nutrition Institute (IPNI)** à la liste des éléments "**bénéfiques**", sur la base d'évidences scientifiques solides (protection contre stress biotiques et abiotiques)

Une seule méthode de dosage du Si "biodisponible" standardisée en routine.

Extraction du Si au CaCl_2

M. Caubet et al. 2020 ; Agriculture increases the bioavailability of silicon, a beneficial element for crop, in temperate soils

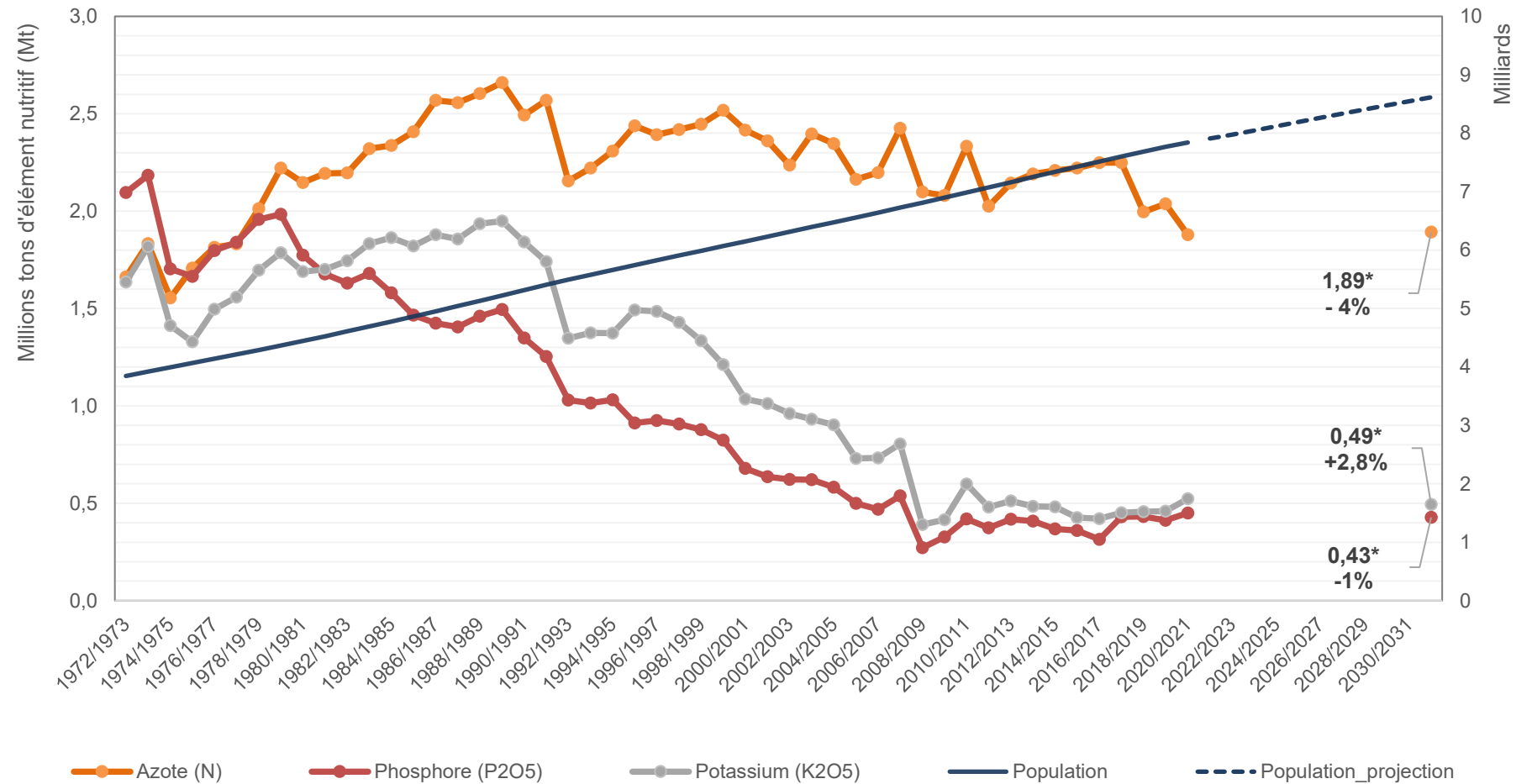
Merci de votre attention

Phosphore, Arsenic et Silicium en culture de céréales : éléments minéraux désirés
ou indésirables....



Phosphore et agrofourmiture

Un contexte de réduction de la consommation des engrais de 45%

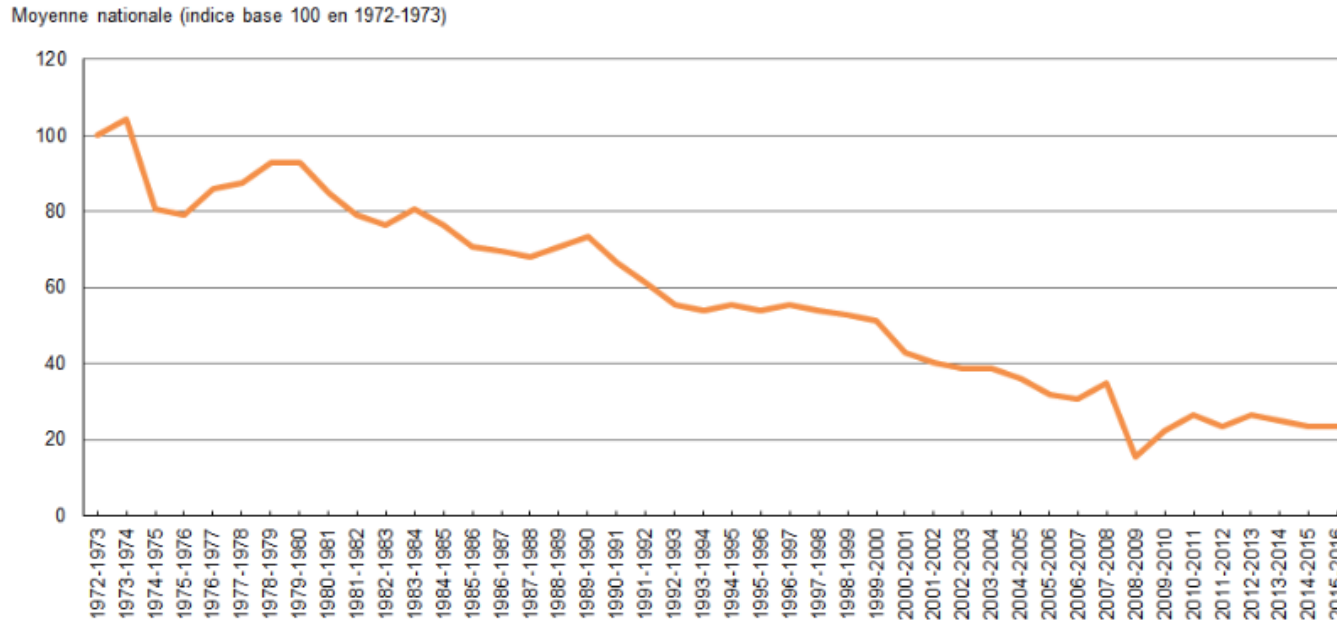


Sources: UNIFA (2022); Fertilizer Europe (2023); Nations Unies - Pôle Population (2022)

* Moyenne basée sur les trois dernières campagnes de culture (2018/2019, 2019/2020, 2020/2021), ajustée conformément au taux de variation estimé par Fertilizer Europe dans sa publication "Forecast of food, farming and fertilizer use in the European Union 2022-2032"

Phosphore et agrofourniture

En 40 ans, les livraisons d'engrais phosphatés ont chuté de 75%



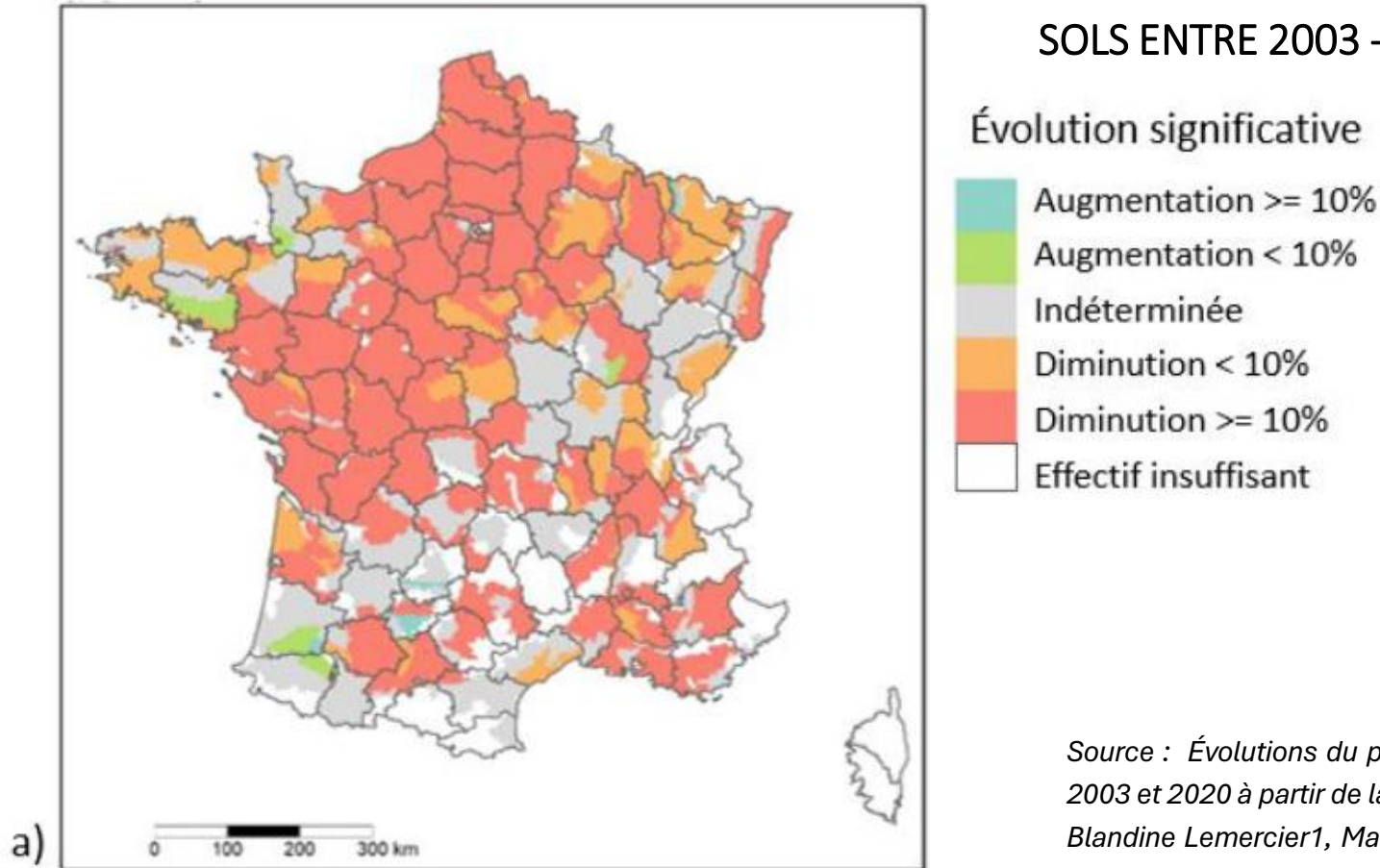
Les ressources de phosphates sont limitées. Les ressources minérales mondiales sont estimées à plus de 300 milliards de tonnes en 2018. Les plus grands gisements sédimentaires se trouvent en Afrique du Nord (Maroc, Tunisie), en Chine, au Moyen-Orient et aux États-Unis. Les gisements de phosphore exploités proviennent essentiellement de dépôts sédimentaires ou marins, mais aussi de dépôts magmatiques ou de guano issus d'excréments d'oiseaux marins.

Source : <https://www.notre-environnement.gouv.fr/> (CGDD, 2025)

Phosphore et agrofourniture

Près de 28 % des terres agricoles souffrent d'une forte déficience en phosphore, et 87 % nécessitent des apports réguliers pour maintenir leur fertilité

EVOLUTION DES TENEURS EN PHOSPHORE (P2O5) DES SOLS ENTRE 2003 -2011 ET 2012 -2020

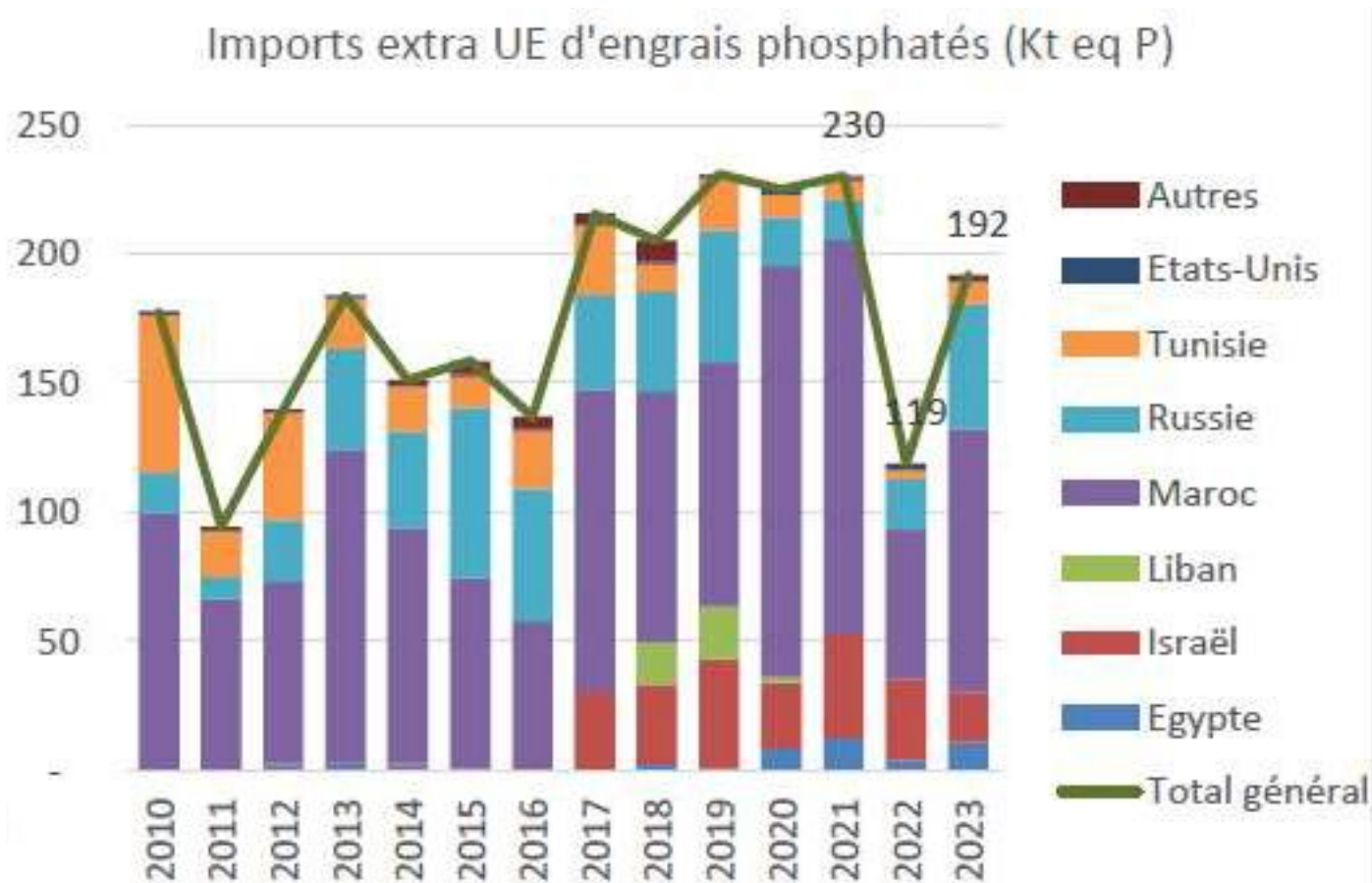


Source : Évolutions du pH et des teneurs en P K Mg dans les sols de France hexagonale entre 2003 et 2020 à partir de la Base de Données des Analyses de Terre; COMIFER GEMAS 2023

Blandine Lemerrier¹, Manon Caubet¹, Nolwenn Le Pioufle², Eva Rabot², Catherine Pasquier², Antonio Bispo², Nicolas Saby

Phosphore et agrofourniture

Les principales sources d'importation sont le Maroc, la Russie, l'Égypte, la Tunisie et Israël.



Source : « Étude sur le fonctionnement général du marché des engrais minéraux dans la situation spécifique des filières grandes cultures » - FranceAgriMer 2024

Silicium et agrofournitures

Le silicium apparait comme un élément de plus en plus important en agrofournitures. De nombreux produits voient le jour et les revendications sont très larges...

De la nutrition des plantes, à son effet tampon des sols voire le captage de carbone, jusqu'à un effet biostimulant anti-stress, cet élément est sous les feux des projecteurs !

Silicium et agrofournitures

Le silicium apparaît comme un élément de plus en plus important en agrofournitures. De nombreux produits voient le jour et les revendications sont très larges...

De la nutrition des plantes, à son effet tampon des sols voire le captage de carbone, jusqu'à un effet biostimulant anti-stress, cet élément est sous les feux des projecteurs !

SOUS FORME SOLIDE (Zeolite chabasite, clinoptilolite...) ©

Application et revendication au sol

Produit FertiRoc®
Biostimulant



POWER THE NATURE



**10% DE
RENDEMENT
SUPPLÉMENTAIRE**

Réduire les engrais azotés sans perte de rendement



ZEOCEL
growing together

**SOUS FORME LIQUIDE (extrait prêle / bambou) ou
EN SUSPENSION avec zeolite particulaire**

Application foliaire



Arsenic et agrofouritures

Des **dérivés minéraux de l'arsenic** ont été employés très longtemps pour leur effet biocide comme **produits phytosanitaires** :

- sous forme d'arsenate de plomb pour lutter contre les doryphores de la pomme de terre, il a été autorisé jusqu'en 1971;
- sous forme d'arsenate de sodium pour lutter contre les maladies fongiques de la vigne (esca et excoïose), il a été autorisé jusqu'en 2001

document INRS, 2004 (exposition à l'arsenic en viticulture)

Arsenic et agrofournitures

Des **dérivés minéraux de l'arsenic** ont été employés très longtemps pour leur effet biocide comme **produits phytosanitaires** :

- sous forme d'arsenate de plomb pour lutter contre les doryphores de la pomme de terre, il a été autorisé jusqu'en 1971;
- sous forme d'arsenate de sodium pour lutter contre les maladies fongiques de la vigne (esca et excoriose), il a été autorisé jusqu'en 2001

document INRS, 2004 (exposition à l'arsenic en viticulture)

Les **engrais phosphatés peuvent contenir de l'arsenic** :

- Les concentrations des engrais en arsenic varient selon les roches phosphatées exploitées et les types d'engrais (TSP>DAP>MAP)
- Les apports de ces éléments traces aux sols cultivés sont considérés comme faibles au regard de la masse de sol mais l'effet à long terme est controversé ;

L'application d'engrais TSP/DAP* avec compost semble réduire l'arsenic lessivé des sédiments contenus dans les engrais agricoles.

*Triple Super Phosphate (TSP), Diammonium Phosphate (DAP), and Monoammonium Phosphate (MAP)

Un lien avec le P et les engrais phosphatés ?

Un suivi des intrants à ne pas minimiser ?

Sources : California Department of Food and Agriculture (<https://www.cdffa.ca.gov/is/docs/cdfafinalreport.pdf>) , Hartley et al., 2013 (<https://inis.iaea.org/records/s30c3-48q57>); Hashem et al., 2024 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016424001889>)

Les exposés

1. Lucien STOLZE et Claude PLASSARD

Absorber du phosphore ou de l'arsenic : les cultures peuvent-elles choisir ?
De la biodisponibilité dans les sols aux mécanismes d'assimilation

2. Bruno DELVAUX

Le cycle sol-plante du silicium

3. Jean-Dominique MEUNIER

Apport du silicium dans la culture des céréales : les verrous scientifiques