

CHAPITRE 3

INTERPRÉTER des TENEURS et DÉTECTER des CONTAMINATIONS (mêmes modérées)



QUESTION (Rappel)

Que penser d'une TENEUR en **CADMIUM** de **1,75 mg/kg**
et d'une TENEUR en **PLOMB** de **85 mg/kg**
dosées dans l'horizon de SURFACE d'un sol cultivé ?

**POUR RÉPONDRE à ce TYPE DE QUESTION,
3 APPROCHES = 3 MÉTHODES**

COMPARAISON VERTICALE

Principe : les teneurs en ETM de l'horizon de surface considéré sont comparées à celles des horizons sous-jacents.

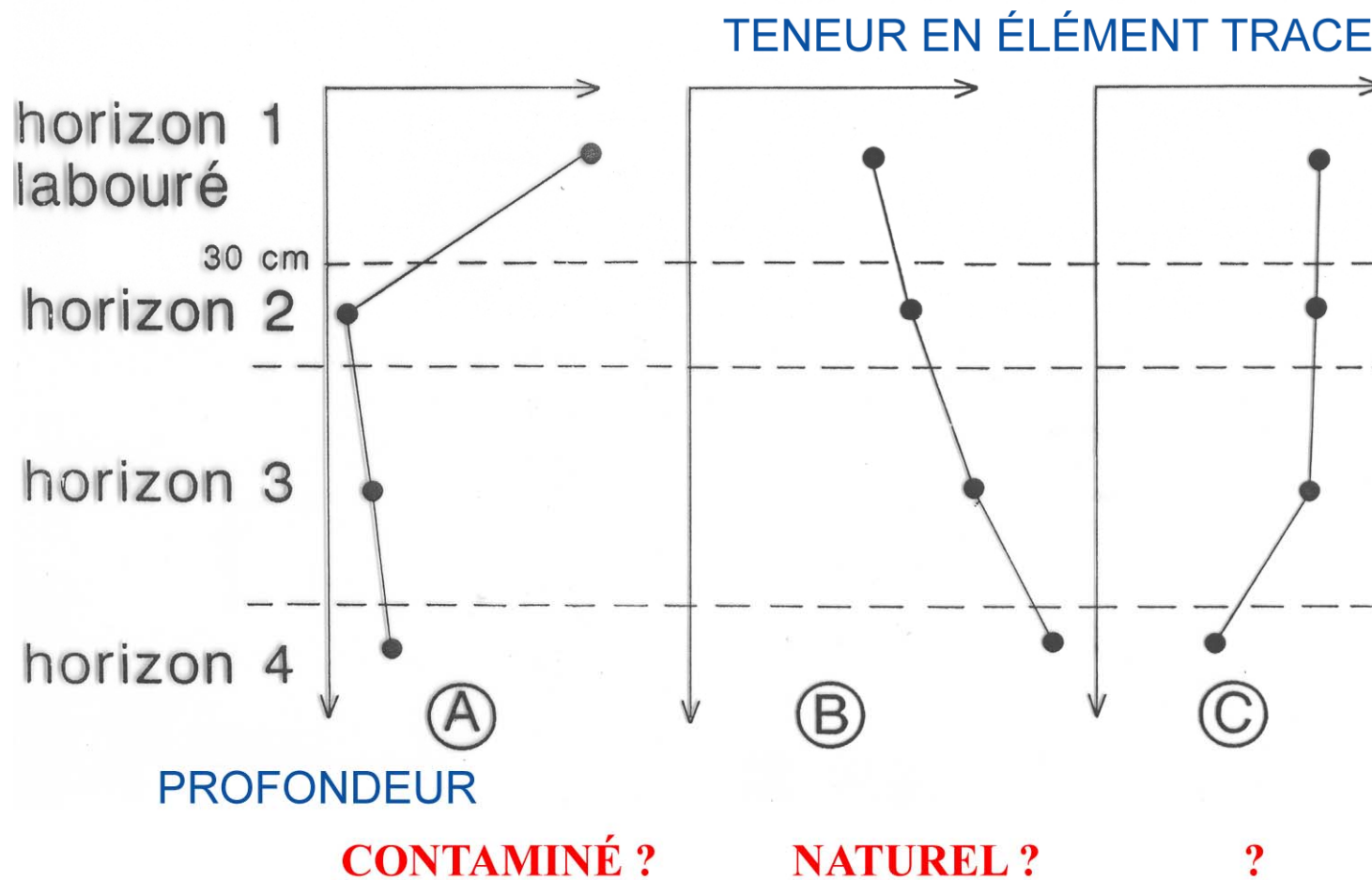
Aucune raison pour que ces teneurs soient beaucoup plus élevées en surface.

Au contraire, en France ou en Europe, beaucoup de sols montrent des horizons supérieurs appauvris en argile en fer et donc en la plupart des ETM

(cas des LUVISOLS, NÉOLUVISOLS, PLANOSOLS).

illustrations !

PRINCIPE de la COMPARAISON VERTICALE



VAULT DE LUGNY (Avalonnais) - "Sol marron" - Plate-forme sinémurienne.

Iden	profond.	horizon	argile	carbone	pH	CEC	Cu	Co	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni	Fe	Mn
	<i>cm</i>		%	%		<i>m.é.</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	%	<i>mg/kg</i>
VDL1	0 - 26	LE	24,7	1,23	5,9	17,0	18,0	23,7	71,3	1,20	134	436	64,5	4,17	5833
VDL2	26 - 40	BT	53,1	0,64	7,0	23,0	21,0	24,9	81,9	2,50	192	783	78,6	6,04	7385
VDL3	40 - 58	BT	52,4	0,57	7,2	23,7	23,6	28,3	89,0	3,40	218	968	97,1	6,51	9200
VDL4	58 - 90	BT	59,2	0,54	7,4	24,5	25,3	26,5	96,2	4,30	245	1138	101,0	6,94	9045
VDL5	90 - 95	BR	60,3	0,42	7,7	31,0						1999		8,55	24975

Seuils de la réglementation française
sur l'épandage des boues d'épuration en agriculture :

100		150	2,00	100	300	50
-----	--	-----	------	-----	-----	----

**APPLICATION de la COMPARAISON VERTICALE CONCENTRATIONS TRES FORTES EN SURFACE
ALLANT ENCORE CROISSANT AVEC LA PROFONDEUR !**

NOUAILLÉ (Vienne) - "Bornais"

Céréaliculture. Sol hydromorphe développé dans des argiles plio-quaternaires, appauvri en argile en surface.

	profond.	horizon	argile	CEC	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	cm		%	m.é./100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	0 - 25	LE	11,0	4,3	0,10	22,5	32,1	7,4	20,2	29
2	40 - 60	Sg	32,8	9,2	0,17	46,3	8,2	16,1	26,9	38
3	80 - 100	SC	37,0	10,9	0,14	49,5	7,1	16,5	26,1	40

Légère contamination
en Cu = ancienne vigne

PRÉVESSIN (Ain) - Pays de Gex

Calcisol de moraines calcaires.

	profond.	horizon	argile	CEC	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Co
	cm		%	m.é./100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
P1-1	0 - 30	L	24,5	14,3	0,21	164	26,3	117	23,3	16,9
P1-2	30 - 60	S1	21,6	9,8	0,10	175	25,9	126	20,6	18,4
P1-3	60 - 90	S2	32,7	13,3	0,07	226	34,1	188	23,2	23,3

Anomalies naturelles
en Cr et Ni (débris de
roches vertes)

Seuils de la réglementation française

sur l'épandage des boues d'épuration en agriculture

2,00	150	100	50	100
------	-----	-----	----	-----

APPLICATIONS de la COMPARAISON VERTICALE

COMPARAISON VERTICALE (2)

Les teneurs en ETM de l'horizon de surface considéré sont comparées à celles des horizons immédiatement sous-jacents.

- **méthode très simple - 3 ou 4 prélèvements superposés en un même point**
- **ne nécessite pas de connaissances pédologiques - ni générales ni locales**
- **mais il faut savoir prendre en compte d'éventuels gradients de Carbone, argile, Fer ...**
- **permet de traiter seulement les horizons de surface**
- **méthode plus délicate pour Pb et Cd qui sont presque toujours plus abondants en surface**
- **repose sur l'hypothèse que le contaminant est resté en surface. -**
Interprétation difficile si migrations vers la profondeur.

PREUVE de la CONTAMINATION par COMPARAISON VERTICALE

NOYELLES-GODAULT (Evin Malmaison)
Agriculture

Proximité usine METALEUROP
Traitement des métaux non ferreux

Iden	profond.	horizon	Argile	Carb.	pH	CEC	CO3Ca	Cu	Co	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni
	<i>cm</i>		%	%		<i>m.é./100g</i>	%	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>
EVI1	0 - 12	L1					0	19,2	11,6	38,3	8,20	500,0	620	19,7
EVI2	12 - 27	L2	17,9	1,23	8,3	12,4	0	20,5	9,9	38,6	8,10	524,0	637	19,2
EVI3	27 - 34	L3					0	20,4	8,9	38,9	8,20	525,0	635	18,7
EVI4	34 - 45	EB	20,9	0,53	8,3	12,6	0	10,4	10,1	40,1	0,23	33,4	64	19,6
EVI6	70 - 82	BC	24,5	0,40	8,3	12,1	0	8,9	13,0	51,6	0,08	22,8	49	29,1
EVI8	106 - 124	C2	16,1	0,16	8,4	9,8	12,4	8,6	11,5	47,1	0,09	18,0	48	26,0
EVI9	142 - 175	C4	16,0	0,09	8,4	10,0	1,3	7,1	7,6	58,6	0,04	12,6	40	15,5

Homogénéité de l'horizon labouré !

CORMEILLES en VEXIN (Val d'Oise)

Agriculture intensive.

Luvisol Typique de lœss.

	profond.	horizon	argile	Carb.	Cd	TAHm
	cm		%	%	mg/kg	mg/kg
1	0 - 15	LE	14,7	0,91	0,58	0,30
2	33 - 43	E	15,8	0,41	1,75	0,15
3	60 - 85	BT	27,0	0,32	0,18	0,15
4	120 -145	C	19,1	0,22	0,30	0,10

TAHm teneurs agricoles habituelles max.

Épandage probable de boues d'épuration urbaines.

Le cadmium a migré vers la profondeur, malgré des pH neutres.

COUHINS à Cadaujac (Gironde)

Vignoble des "graves" - sol uniformément sableux et caillouteux

	profond.	horizon	argile	Carb.	Cd	Cr	Cu	Pb
	cm		%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1	0 - 20	L	4,2	1,05	0,25	0,33	195	64,9
2	20 - 40	S1	4,7		0,40	0,19	159	42,4
3	40 - 60	S2	8,9		0,48	0,31	130	36,0

Contamination en profondeur par des traitements phytosanitaires.

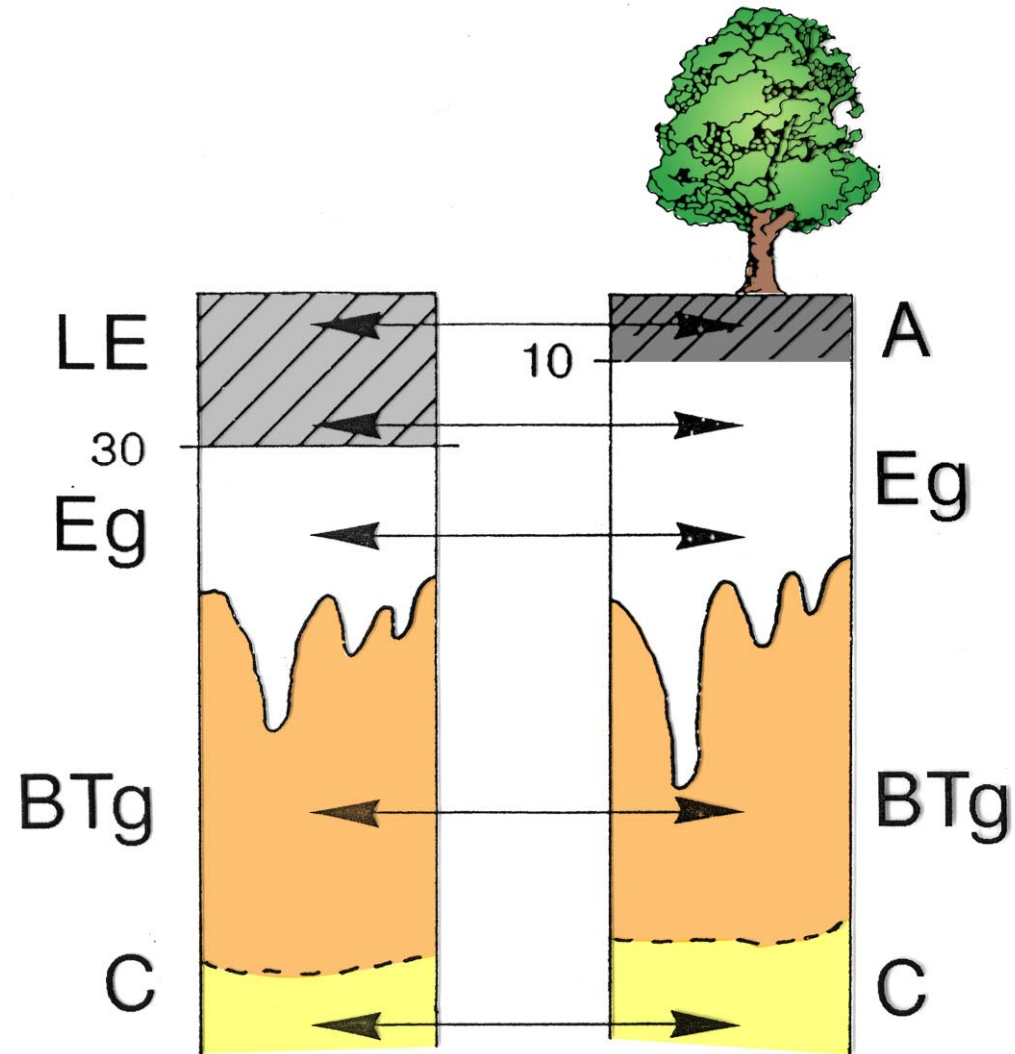
SUITE aux MIGRATIONS des ETM vers la PROFONDEUR, IL N'EST PAS POSSIBLE D'APPLIQUER la COMPARAISON VERTICALE !

COMPARAISON LATÉRALE

Principe : on compare les teneurs de l'échantillon avec les teneurs mesurées dans le même type d'horizon de la même "série de sols, situé sous forêt, à proximité.

- **raisonnement analogique, très proche de celui des expérimentations agronomiques**
- **méthode très simple - quelques prélèvements superposés au point étudié et sur le site forestier "témoin"**
- **permet d'interpréter d'autres horizons que les horizons de surface**
- **repose sur l'hypothèse que le sol sous forêt est demeuré intact de contaminations (sauf retombées atmosphériques). Attention : le site forestier peut avoir été contaminé (récemment ou anciennement).**
- **on ne trouve pas toujours la zone forestière souhaitée**
- **nécessite la présence d'un pédologue pour reconnaître l'appartenance des 2 sols à la même "série" et l'équivalence des horizons.**

COMPARAISON LATÉRALE (Principe)



COMPARAISON LATÉRALE (une même série)

ZINC

teneurs en mg / kg

LUVISOLS DÉGRADÉS

de limons anciens du SE du bassin de Paris

1-C		1-F	
LE	41	31	A
		31	E1
E	42	41	E2
BT	48	58	BT

2-C		2-F	
LE	38	31	A
		31	E1
E	34		
BT	60	46	BT

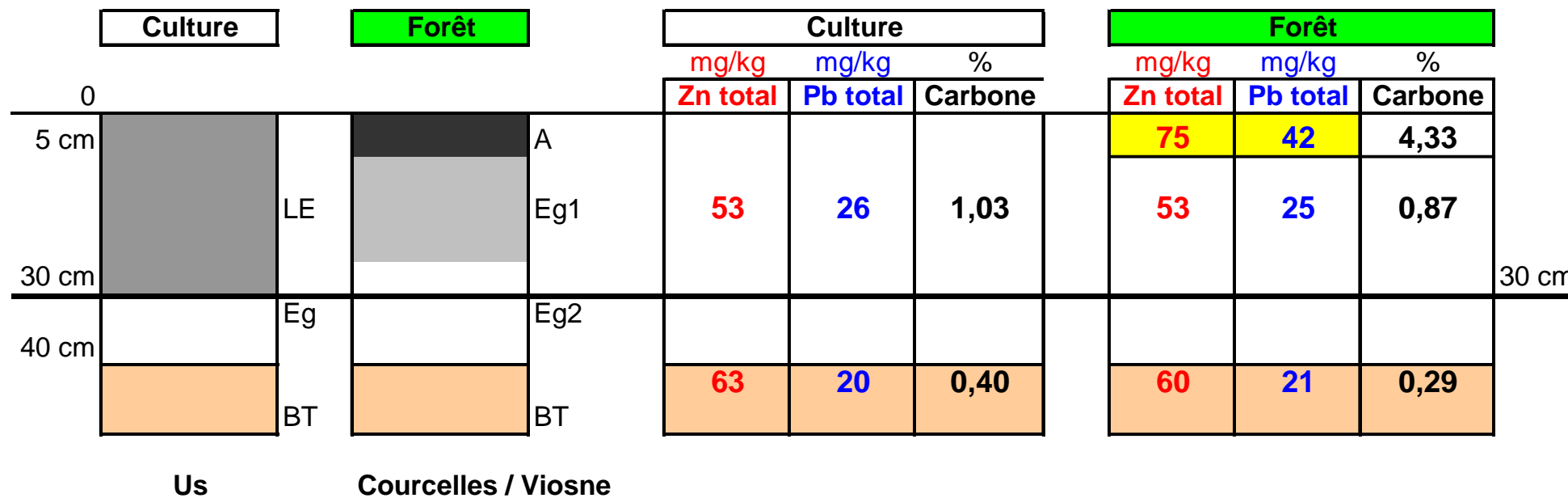
3-C		3-F	
LE	37	41	A
		37	E1
E	42		
BT	62	65	BT

4-C		4-F	
LE	28	32	A
		25	E1
E	30		
BT	42	48	BT

Bézu-le-G			
boues	6-F		
LE	162	46	A
		24	E1
E1	55	59	E2
E2	49		
BT	81	71	BT

PRENDRE en COMPTE les GRADIENTS de MATIÈRES ORGANIQUES et les ÉPAISSEURS des HORIZONS

LUVISOLS TYPIQUES de loess du Vexin



TENEUR MOYENNE sur 30 premiers cm :
en tenant compte de la d. apparente
dapp. (E) >> dapp. (A)

53	26
----	----

56	27
----	----

PLOMB

**COMPARAISON entre un SOL FORESTIER
et le même SOL LABOURÉ
STOCKS sur les 30 PREMIERS cm
(schématique)**

	Concentrations (mg/kg)		Stocks en g/m ²	
	forêt	culture	forêt	culture
0-10 cm	86	29,5	7,74	3,84
10-20 cm	18	29,5	1,98	3,84
20-30 cm	16	29,5	1,92	3,84
	total :		11,64	11,52

Dapp	Dapp
forêt	culture
0,9	1,3
1,1	1,3
1,2	1,3

APPROCHE TYPOLOGIQUE

Principe : les résultats de l'échantillon considéré sont comparés avec les données collectées auparavant sur le même horizon de la même "série de sol".

Une "SÉRIE de SOLS" (catégorie d'une typologie très détaillée)

c'est :

- un type de sol existant réellement dans un **territoire défini**,
- développé dans un **matériau parental** précis,
- parfaitement **caractérisé** pédologiquement,
 - par la morphologie du solum (nature, succession et épaisseur des horizons) ;
 - au plan fonctionnel (régime hydrique) ;
 - au plan minéralogique (nature des minéraux argileux) ;
 - au plan analytique (granulométrie, CEC, fer, carbone, calcaire) etc.

illustrations !

Un exemple de "série" :
les "AUBUES ROUGES"
des Plateaux jurassiques de Basse Bourgogne
(Nièvre, Yonne, Côte d'Or)

Matériau parental : résidus de décarbonatation des calcaires jurassiques sous-jacents

Épaisseur : 40 à 80 cm

Couleur : nettement rougeâtre

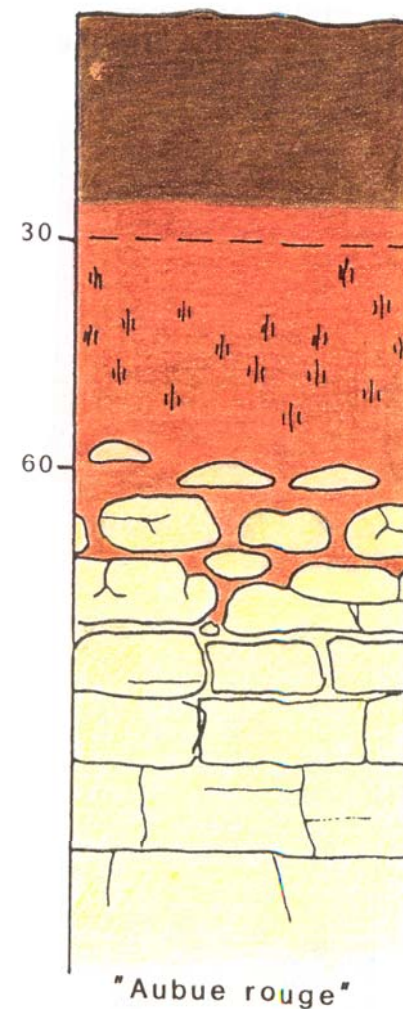
Cailloux : néant

Texture : uniformément argileuse (40 à 70 %)

Structure : très affirmée et stable, micro-polyédrique anguleuse à sur-structure polyédrique

Non calcaire

pH : légèrement acide sous forêt
neutre, resaturé sous cultures



Le RAISONNEMENT TYPOLOGIQUE (général)

On fait l'hypothèse que

SI plusieurs solums (correspondant à un ou plusieurs territoires) ont :

- même MATERIAU PARENTAL (origine, nature et état)
- même POSITION dans le PAYSAGE et
- même MORPHOLOGIE (c'est à dire mêmes horizons se succédant dans le même ordre avec des épaisseurs similaires) **appartiennent à une même SÉRIE**

DONC

- même "histoire" et mêmes **CONSTITUANTS** **ALORS :**
- ces solums (et les territoires associés) ont toutes chances de présenter les mêmes **fonctionnements** et les mêmes **aptitudes** et **contraintes** à telle ou telle utilisation humaine... **et même CC pédo-géochimique naturelle** (CPGN).

*Un bémol cependant : les **interventions de l'Homme***

- **forêt / culture** - drainé / pas drainé - pollué / pas pollué
- chaulé / pas chaulé - compacté / pas compacté, etc.

Comment reconstituer les FONDS PÉDOGÉOCHIMIQUES LOCAUX ?

- il faut **opérer par "SÉRIE de SOLS"** ;
- faire analyser 20 à 40 échantillons pour chaque SÉRIE ;
- prélever des **horizons non ou très peu contaminés**,
donc organiser l'échantillonnage en **PRIVILÉGIANT** :
 - les **solums** demeurés **SOUS FORETS**, supposés indemnes de contaminations ;
 - les **horizons profonds** des solums cultivés (une éventuelle contamination est presque toujours restée en surface) ;
 - les activités humaines ajoutent des ETM mais n'en enlèvent pas. Donc les **valeurs les plus faibles** sont les plus proches de l'état naturel initial.

DIFFICULTÉS

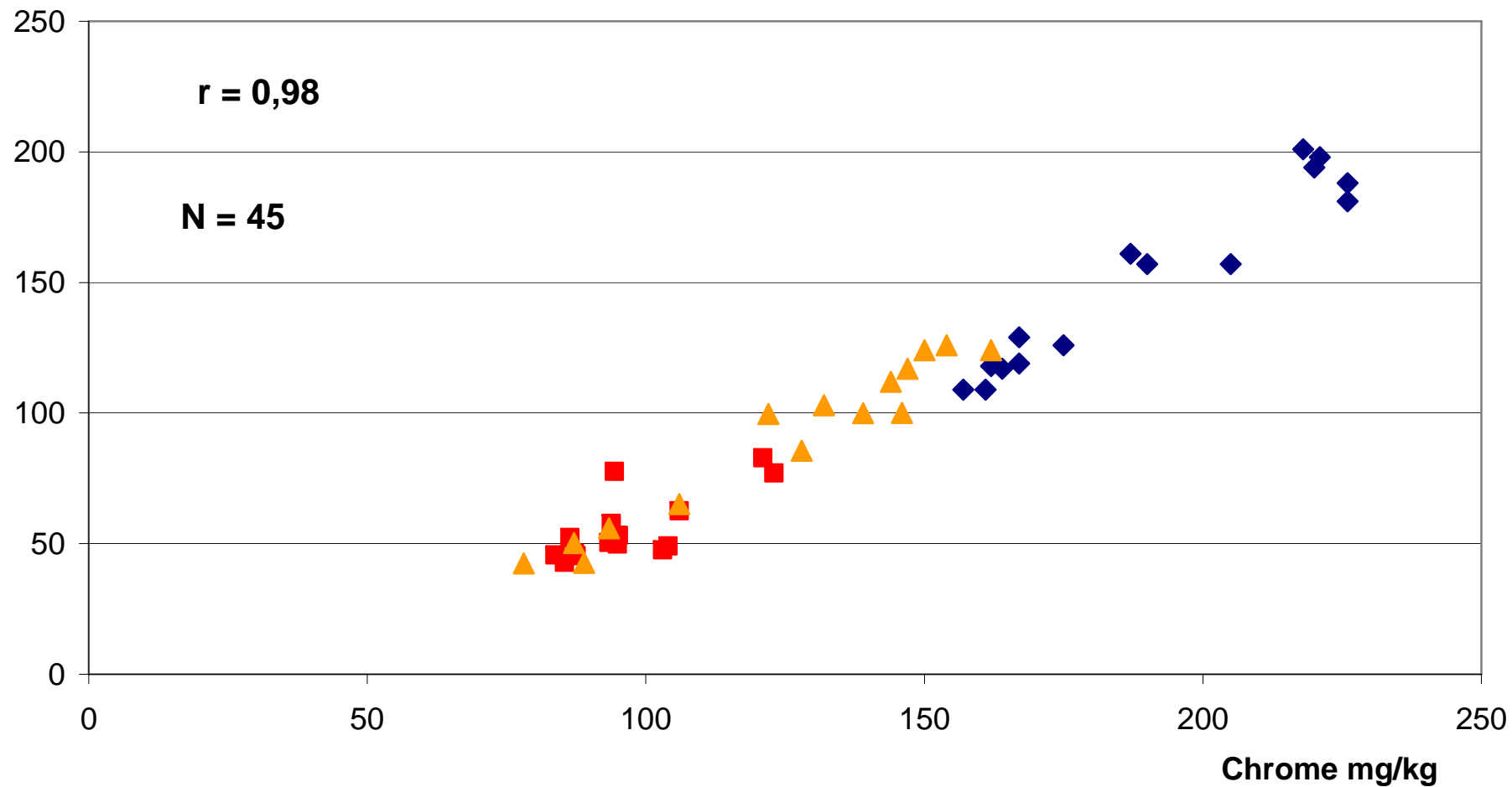
- **présence nécessaire d'un pédologue ;**
- **dans certains secteurs, il n'y a plus de bois ou forêts ;**
- **certaines forêts ont pu être contaminées, anciennement ou récemment ;**
- **certaines contaminations ne sont pas restées dans l'horizon de surface mais sont descendues dans les horizons profonds (cadmium) ;**
- **certaines zones minières ou industrielles sont fortement contaminées sur toute leur superficie ;**
- **problème des sols tronqués : teneurs variables en ETM dans l'horizon de surface.**

HEUREUSEMENT

- **il existe pour chaque "série de sol" des relations naturelles très bonnes (par exemple : Zn/argile ou Cu/Fe ou Cr/Ni) ;**
- **les sols agricoles des zones rurales sont encore peu affectés par des contaminations en ETM d'origine humaine.**

Pays de Gex 3 parcelles - 5 réplicats - 3 prof.

Nickel mg/kg



Les **TENEURS AGRICOLES HABITUELLES**

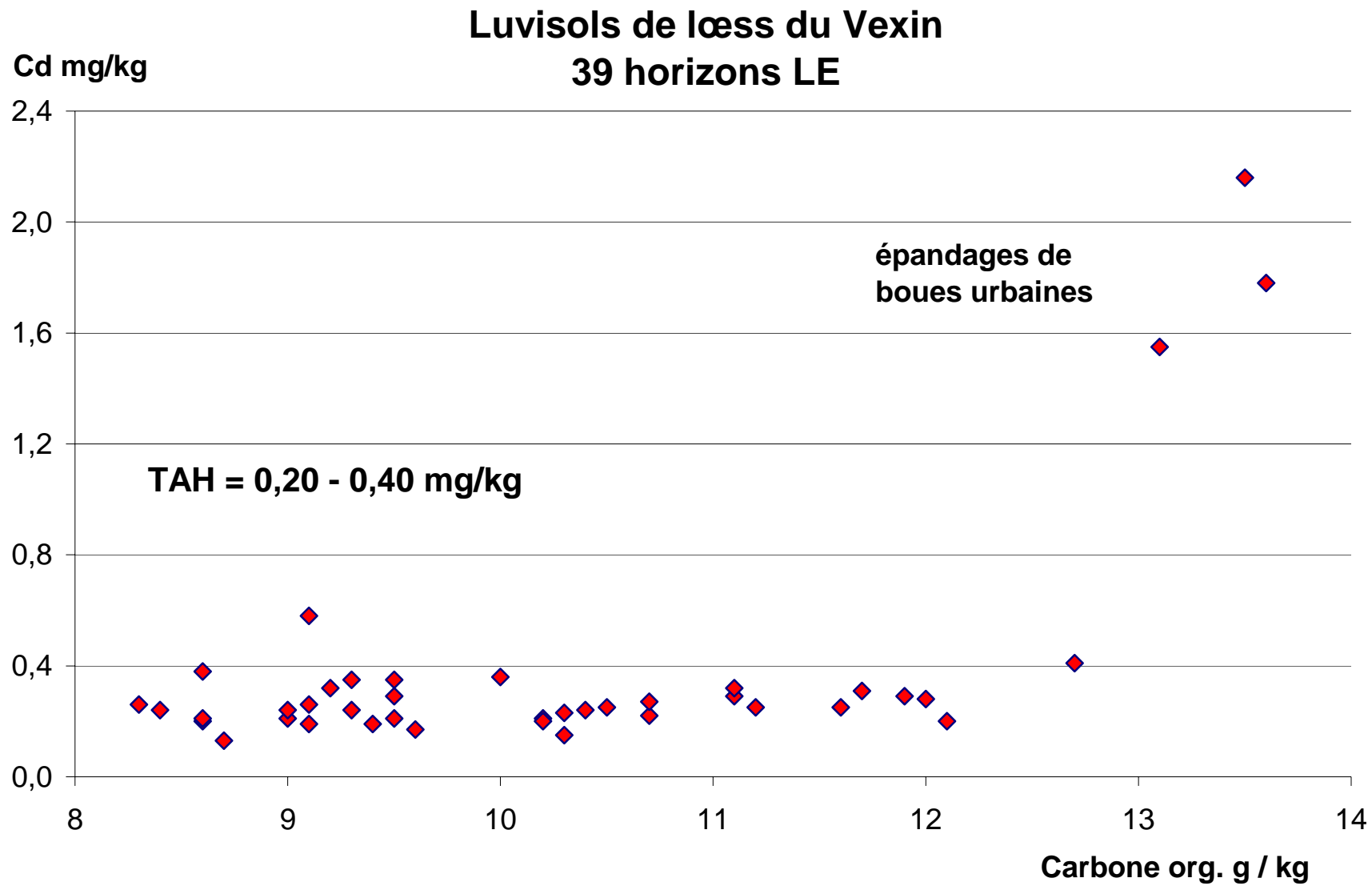
Les **horizons de surface des sols agricoles** ne permettent pas d'évaluer les fonds pédo-géochimiques naturels, puisqu'ils sont touchés par des **CONTAMINATIONS DIFFUSES** (agricoles et atmosphériques) plus ou moins fortes.

Dans ces horizons labourés, la somme des apports en Cd, Hg et Cu est souvent égale ou supérieure aux stocks naturels initiaux.

Les "teneurs agricoles habituelles" (TAH) sont les **GAMMES** de concentrations observées **LE PLUS FRÉQUEMMENT** dans les **HORIZONS de SURFACE** des **SOLS AGRICOLES** soumis à des **PRATIQUES AGRICOLES "USUELLES"**, en l'absence de pollutions ou contaminations majeures (industrielles ou minières).

Cette notion intègre donc une notion statistique de **FRÉQUENCE**.

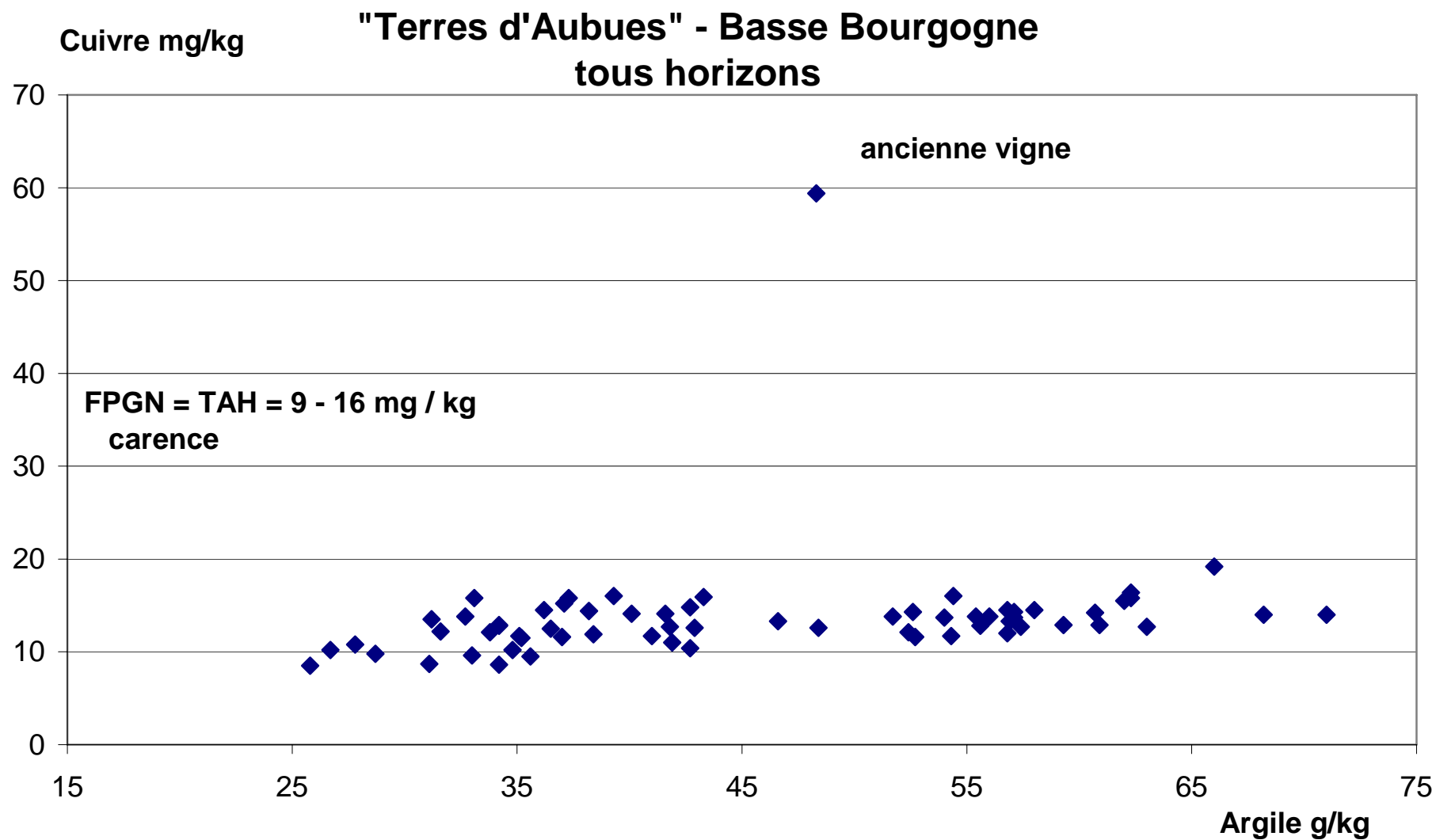
Mais où se situe la limite entre pratiques agricoles "usuelles" et pratiques "inhabituelles" ou "excessives" ?

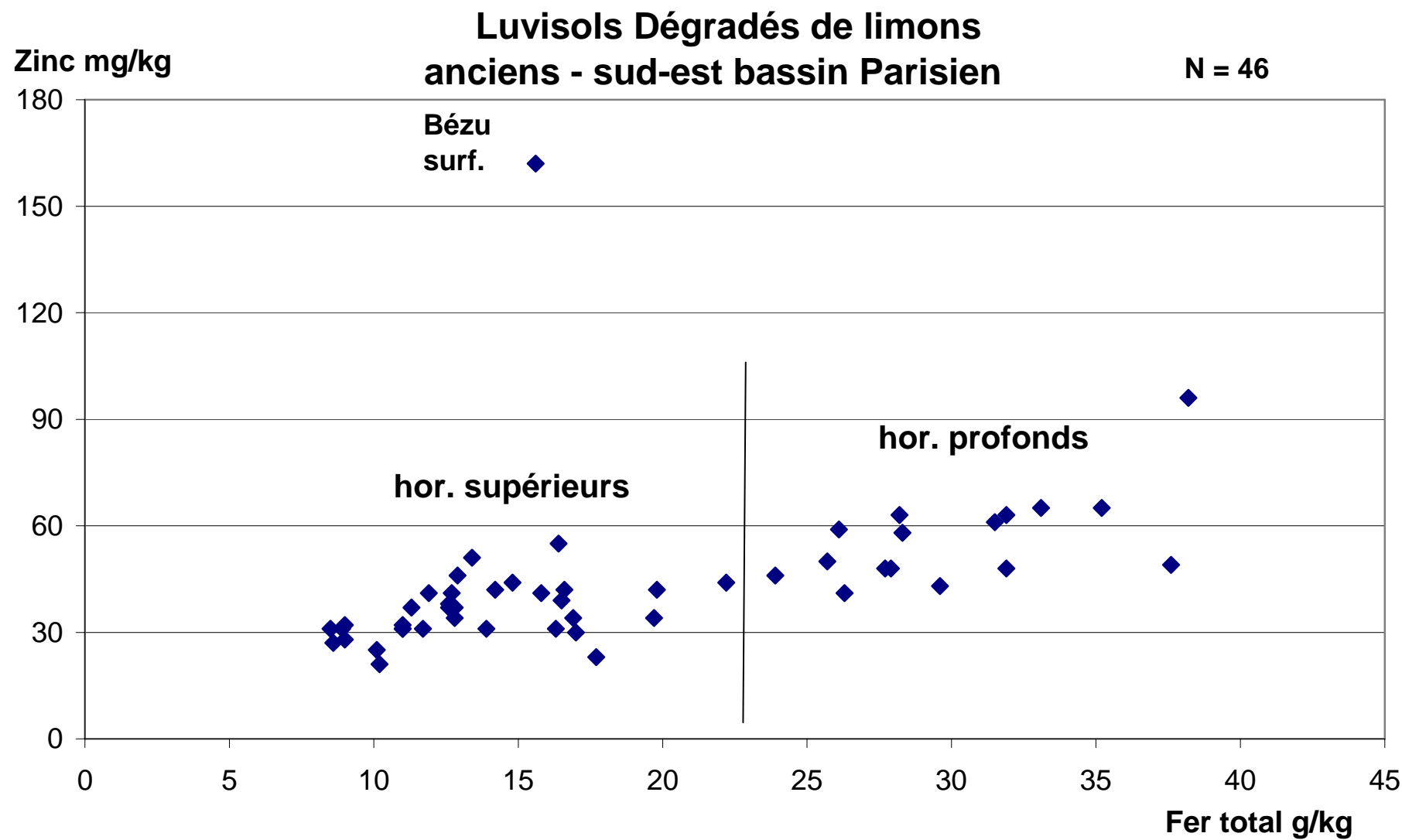


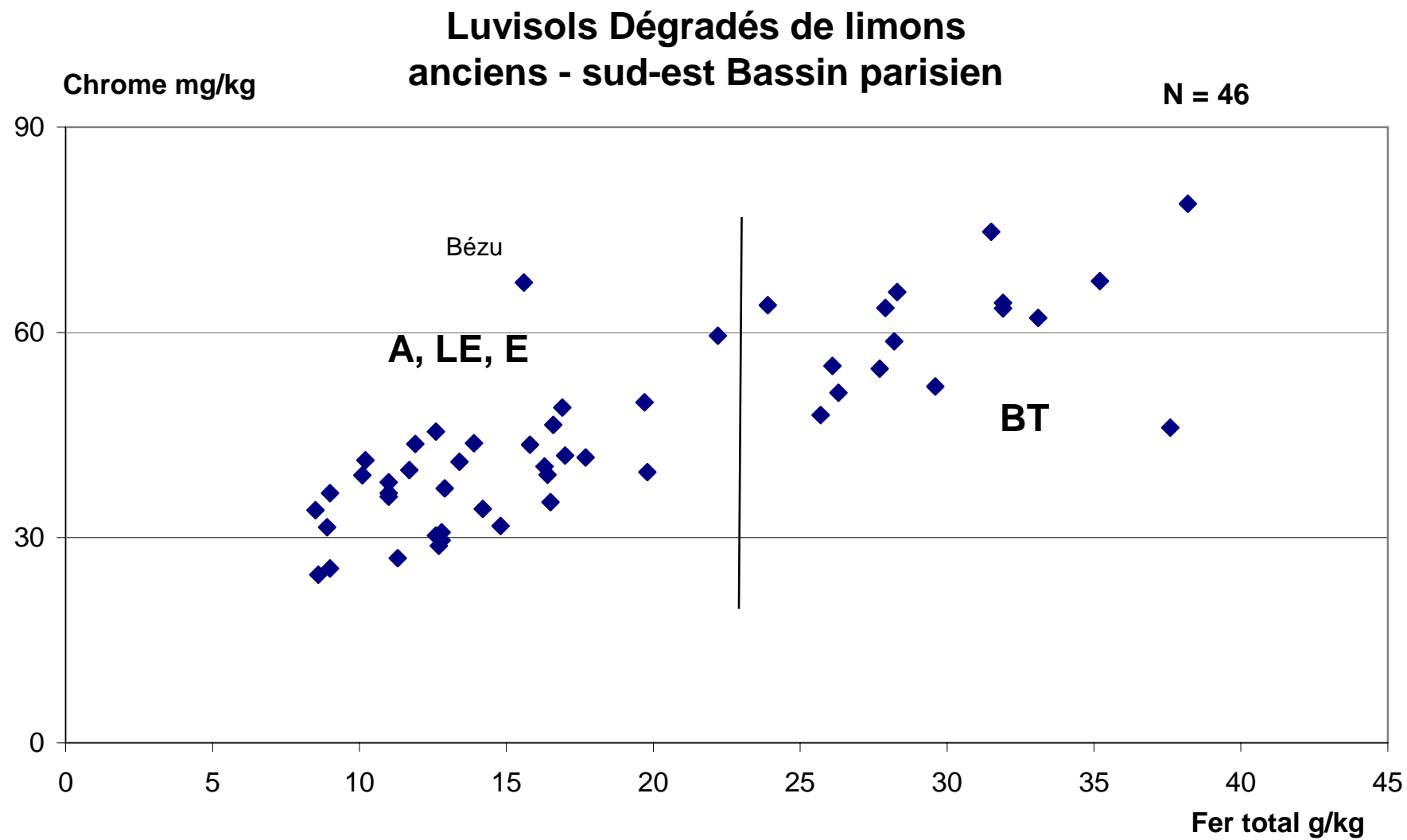
INTÉRÊT de DÉTERMINER les FPGN (et les TAH) par "séries de sols"

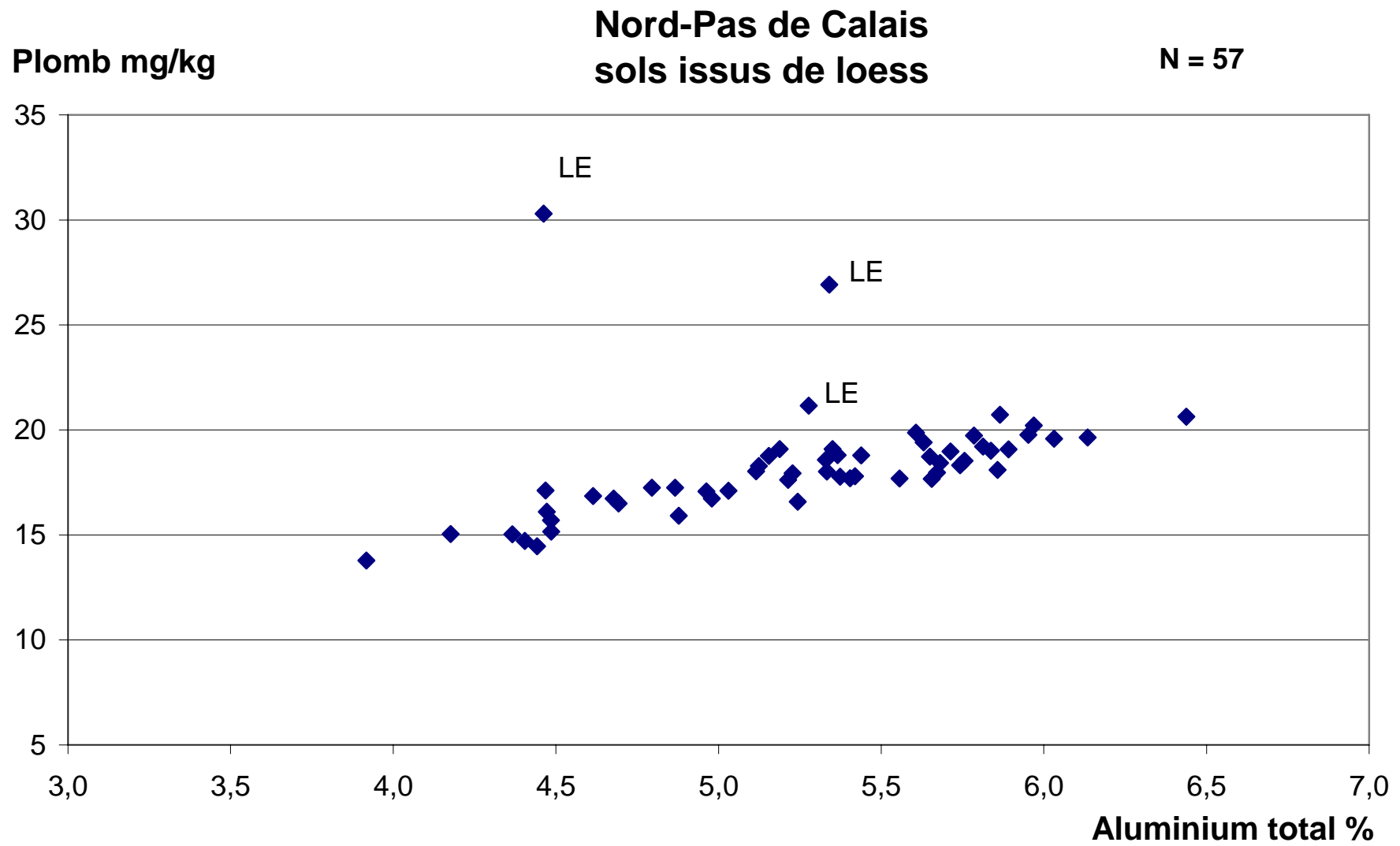
- Cela permet d'**interpréter** intelligemment une concentration mesurée,
- ... et d'évaluer le **niveau de contamination** d'un sol (par un raisonnement typologique).
- On est ainsi capable de faire une distinction entre **métaux naturels** et **métaux apportés** par des activités humaines. Donc possibilité d'une **première estimation** (grossière) **des dangers** pour la santé humaine (via la chaîne alimentaire) et pour notre environnement.
- En outre, la détermination du FPGN local permet de **ne pas déclarer "pollué"** un terrain (avec les graves conséquences socio-économiques et financières que cela entraîne) dans un contexte de fortes anomalies naturelles.
- Enfin, cela permet de fixer des **valeurs cibles de dépollution** réalistes, adaptées au contexte pédologique et géologique.

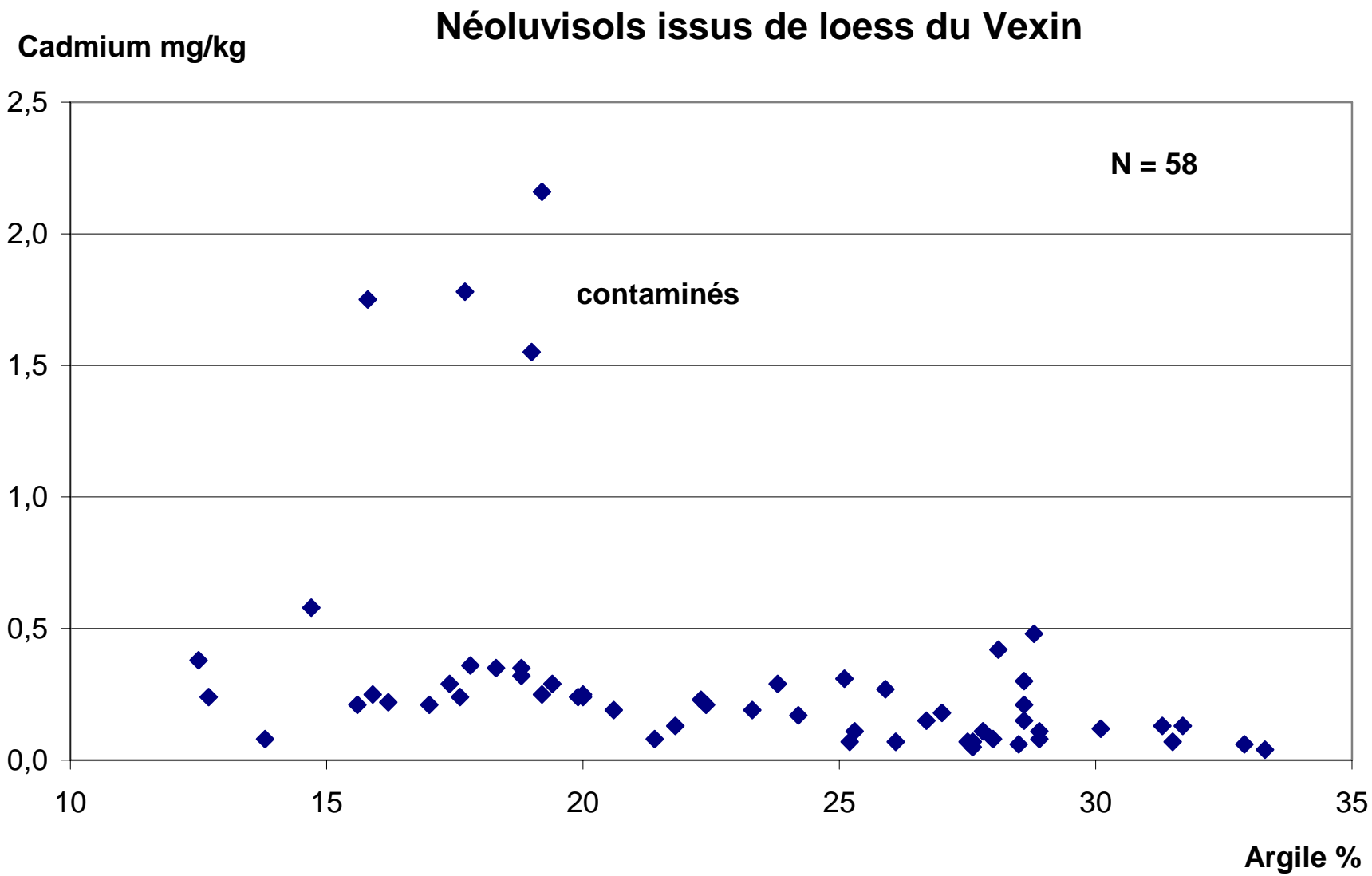
illustrations !

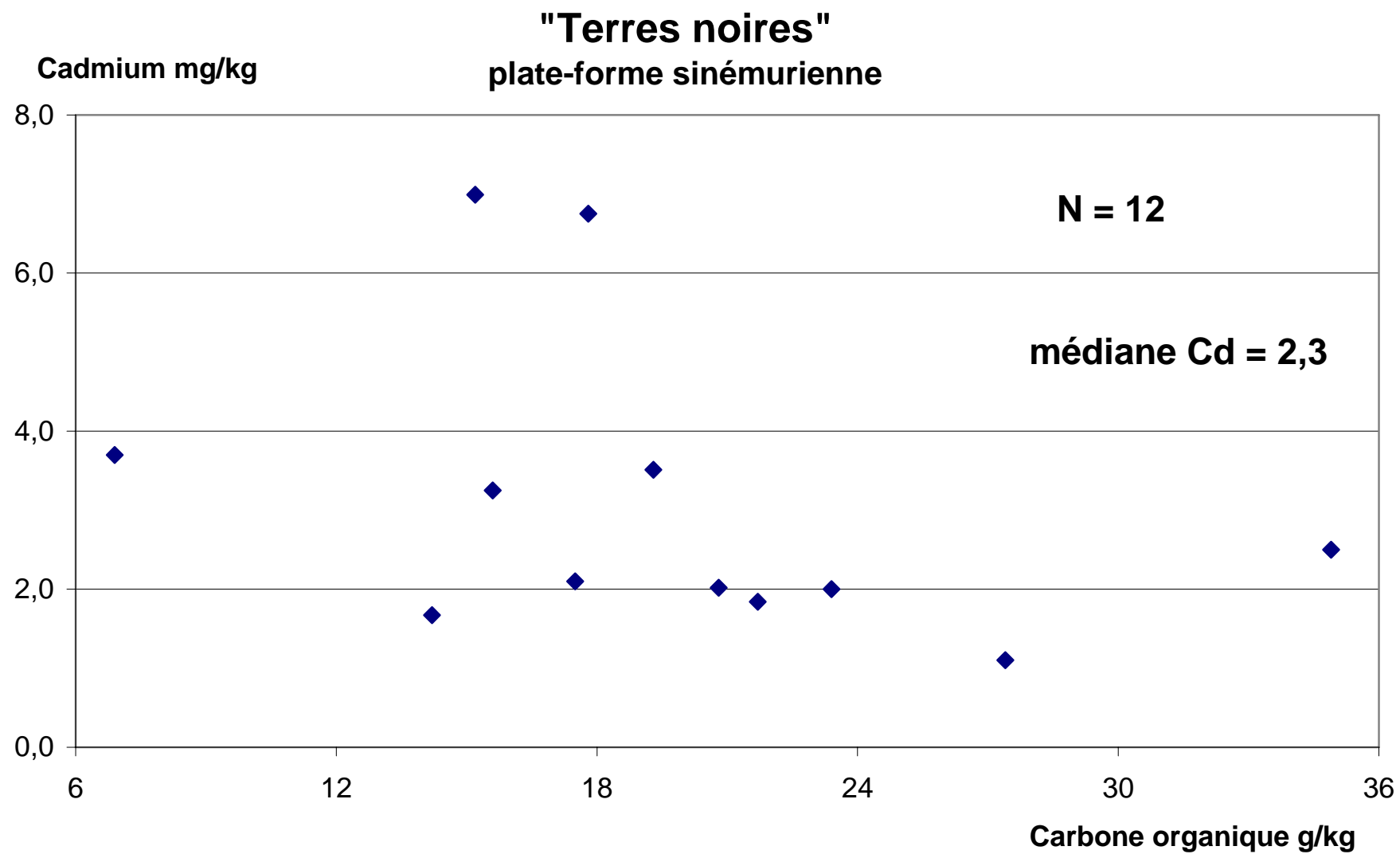












GRACE AUX ÉTUDES par TYPES de SOLS (horizons de surface labourés)

On peut dire qu'une **TENEUR en CADMIUM de 1,75 mg/kg** :

- mesurée dans un **Néoluvisol de loess du Vexin** résulte très probablement **d'une CONTAMINATION** (épandages excessifs de boues ?)

Car, dans ce type de sol, la TAH est $< 0,40$ mg/kg !

- mesurée dans une **"terre noire" de la plate-forme sinémurienne en Terre Plaine** est très probablement **NATURELLE** !

Car les mesures effectuées dans ce type de sol entre 1,1 et 7,0 mg/kg

De même, on peut dire qu'une **TENEUR en PLOMB de 85 mg/kg** :

- mesurée dans un **Néoluvisol issu de loess de Champagne Sénonaise** : résulte certainement d'une **CONTAMINATION**

car la TAH de ce type de sol < 40 mg/kg

- mesurée dans un **sol limoneux dans l'extrême nord du Morvan** (sur roches silicifiées) : elle est **NATURELLE** et même plutôt **faible** !

Car les teneurs mesurées dans ce type de sol sont couramment entre 68 et 3000 mg/kg (médiane 350).

APPROCHE TYPOLOGIQUE (Conclusion)

- c'est la meilleure méthode - **la plus fiable** - **la plus sensible**
- elle permet d'interpréter **tous les types d'horizons** ;
- pour chaque "série de sol", il existe presque toujours de **fortes corrélations naturelles** ETM / Fe ou Al (ou ETM / ETM) qui vont nous guider.
- Mais cette approche requiert des **connaissances pédologiques préalables** pour la "série de sol" considérée :
 - ⇒ une parfaite définition pédologique de cette série (morphologie et données analytiques) ;
 - ⇒ l'analyse des ETM pour un nombre suffisant d'échantillons sélectionnés comme peu ou non contaminés ;
 - ⇒ c'est donc une méthode assez coûteuse et nécessitant la présence active d'un pédologue
- Elle peut servir de base à une **spatialisation** (cartographie) (cf. **chap. 6**).

Calcul des FACTEURS d'ENRICHISSEMENT (1)

Objectif : mesurer ponctuellement l'enrichissement en ETM entre :

- un HORIZON de SURFACE (**H_s**) affecté par les contaminations diffuses (retombées atmosphériques, pratiques agricoles,...)
- et un HORIZON PROFOND ou un MATERIAU PARENTAL (**H_p**) supposé indemne de contamination, servant d'horizon de référence

Nécessité de choisir un **élément de référence** :

- non affecté par les activités humaines
- abondant (sur lequel il y a peu d'incertitude analytique)
- géochimiquement peu mobile et peu touché par les phénomènes red-ox

→ l'aluminium total [Al]

Calcul pour un élément :

$$FE = ([E]_{H_s} / [Al]_{H_s}) / ([E]_{H_p} / [Al]_{H_p})$$

[E] = concentration totale en cet élément

FE = 1 signifie qu'il n'y a pas eu d'enrichissement !

Calcul des FACTEURS d'ENRICHISSEMENT (2)

Avantages : on s'affranchit de l'effet de certains processus pédogénétiques comme l'illuviation d'argile, la dilution par le CaCO_3 ou par des matières organiques...

Inconvénients :

- il faut disposer des déterminations de l'élément de référence (Al total) ce qui rarement la cas ;
- et d'un horizon profond de référence adéquat = développé dans le **même matériau parental** que l'horizon de surface considéré.

Exemples : tous types de sols en Nord-Pas de Calais ([Sterckeman et al., 2007](#))

FE \pm 1	pour Co, Cr ; Ni, V
FE entre 1,1 et 1,5	pour As, Bi, Mo, Tl
FE entre 1,5 et 2	pour Cu, Mn, Sb, Sn
FE > 2	pour Cd, Hg, Pb, Se.