

Mardi 4 juin 2024



Olivier Faure - Frédéric Paran

Steve Peuble

Rachel Seillier

Frédéric Gallice

Prise compte de la biodisponibilité
pour la caractérisation et la gestion des sites
contaminés

olivier.faure@mines-stetienne.fr
frederic.paran@mines-stetienne.fr
steve.peuble@mines-stetienne.fr
rachel.seillier@mines-stetienne.fr
frederic.gallice@mines-stetienne.fr

DVD Neyron - *Point d'étape*



DVD Neyron
-EPA-SAINT-ÉTIENNE-

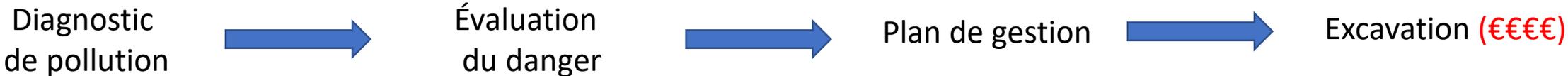
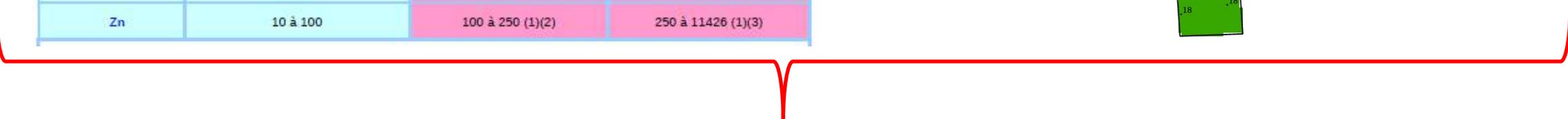
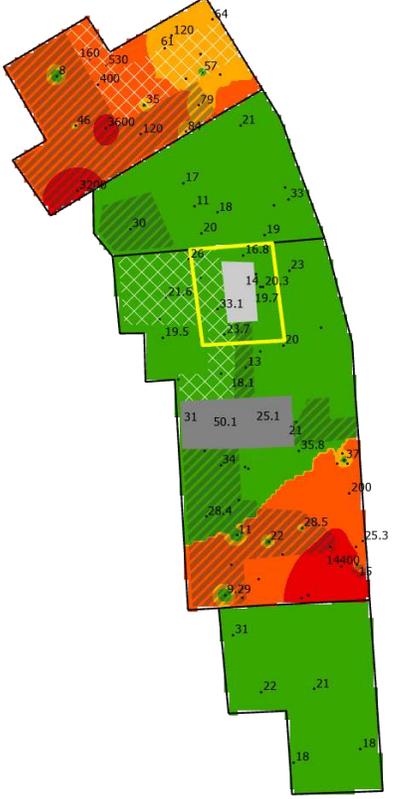
L'analyse des teneurs totales en polluants : une étape nécessaire, mais pas suffisante pour l'évaluation des risques...

L'approche couramment utilisée pour la caractérisation des sols contaminés se limite très souvent à mesurer les teneurs totales en polluants dans le sol à étudier et à les comparer à des valeurs de référence

(Méthodologie Nationale de Gestion des Sites et Sols Pollués, 2017)

Les gammes de valeurs présentées ci-dessous mg/kg. Les numéros entre parenthèses renvoient à des types de sols effectivement analysés, succinctement décrits et localisés ci-dessous.

Métaux et Métaalloïde	Gamme de valeurs couramment observées dans les sols "ordinaires" de toutes granulométries	Gamme de valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées	Gamme de valeurs observées dans le cas de fortes anomalies naturelles
Ae	1,0 à 25,0	30 à 60 (1)	60 à 284 (1)
Cd	0,05 à 0,45	0,70 à 2,0 (1)(2)(3)(4)	2,0 à 46,3 (1)(2)(4)
Cr	10 à 90	90 à 150 (1)(2)(3)(4)(5)	150 à 3180 (1)(2)(3)(4)(5)(8)(9)
Co	2 à 23	23 à 90 (1)(2)(3)(4)(8)	105 à 148 (1)
Cu	2 à 20	20 à 62 (1)(4)(5)(8)	65 à 160 (8)
Hg	0,02 à 0,10	0,15 à 2,3	
Ni	2 à 60	60 à 130 (1)(3)(4)(5)	130 à 2076 (1)(4)(5)(8)(9)
Pb	9 à 50	60 à 90 (1)(2)(3)(4)	100 à 10180 (1)(3)
Se	0,10 à 0,70	0,8 à 2,0 (6)	2,0 à 4,5 (7)
Tl	0,10 à 1,7	2,5 à 4,4 (1)	7,0 à 55,0 (1)
Zn	10 à 100	100 à 250 (1)(2)	250 à 11426 (1)(3)



La gestion des sites contaminés sur la base des teneurs totales en polluants, ne tient pas compte de leur mobilité potentielle dans le sol

$$\text{Risque} = R = f(D, T, C)$$

D = Danger :

Nature et concentration
du polluant

T = Transfert :

Mobilité potentielle du
polluant dans le sol

C = Cible :

Récepteur du polluant (Enfants, adultes, espèces
animales ou végétales, nappe phréatique)



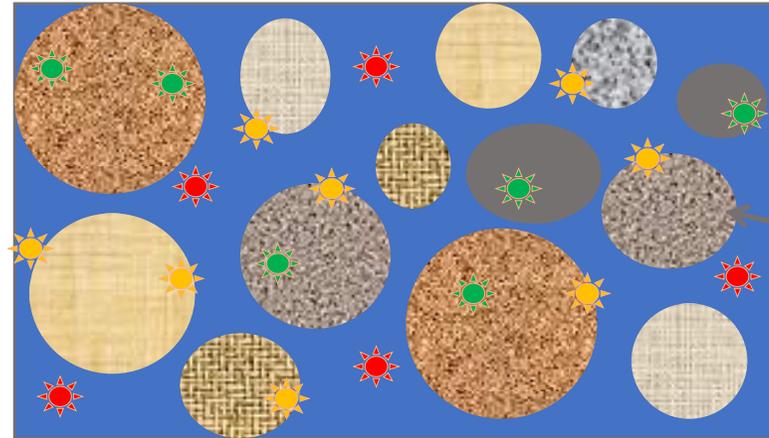
Les contaminants présents dans un sol sont répartis de façon complexe entre les différentes phases porteuses et y sont plus ou moins fortement liés

Teneur totale

Contaminants en solution
(très « transférables »)

Contaminants adsorbés à
la surface des particules
(peu « transférables »)

Contaminants inclus dans
la maille cristalline des
minéraux
(non « transférables »)



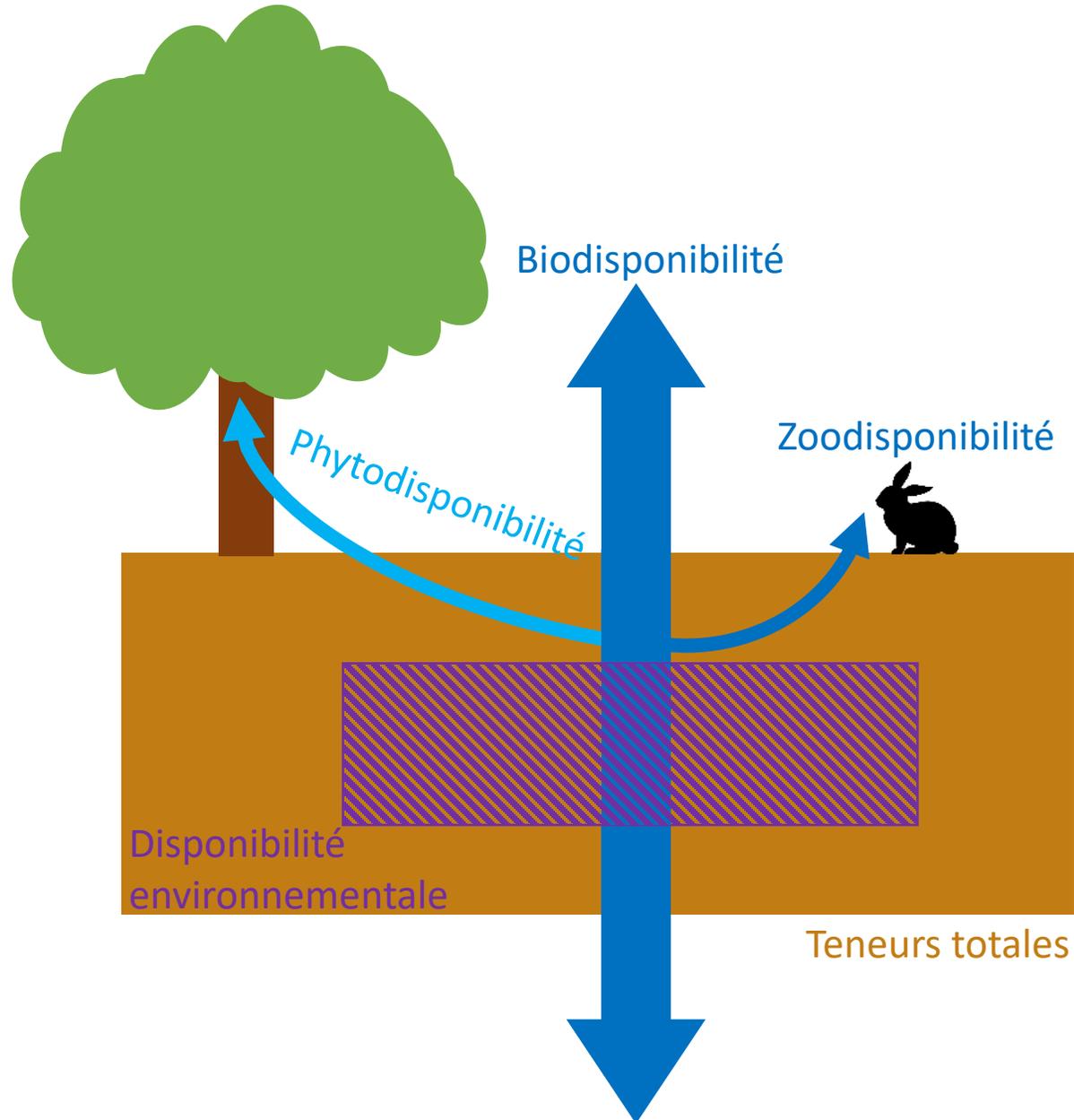
Phase liquide

Phase solide

- Minéraux (Argiles, oxydes, carbonates)
- Matière organique

Ignorer le paramètre « transfert » est une approche « worst-case », qui conduit souvent à une surestimation des risques et donc à une augmentation des coûts de traitement !

Voies de transferts



★ Teneurs totales

Éléments
contenus dans
toutes les
fractions du sol
(Extraction eau régale)

★ Disponibilité environnementale

Éléments facilement
extractibles du sol
(Extraction CaCl_2)

★ Phytodisponibilité

Éléments accumulés
dans les feuilles des
plantes
(Extraction $\text{HNO}_3 + \text{HF}$)

Comment déterminer les fractions transférables des contaminants et, plus généralement, comment mieux évaluer la qualité d'un sol pollué et son risque pour les organismes vivants ?

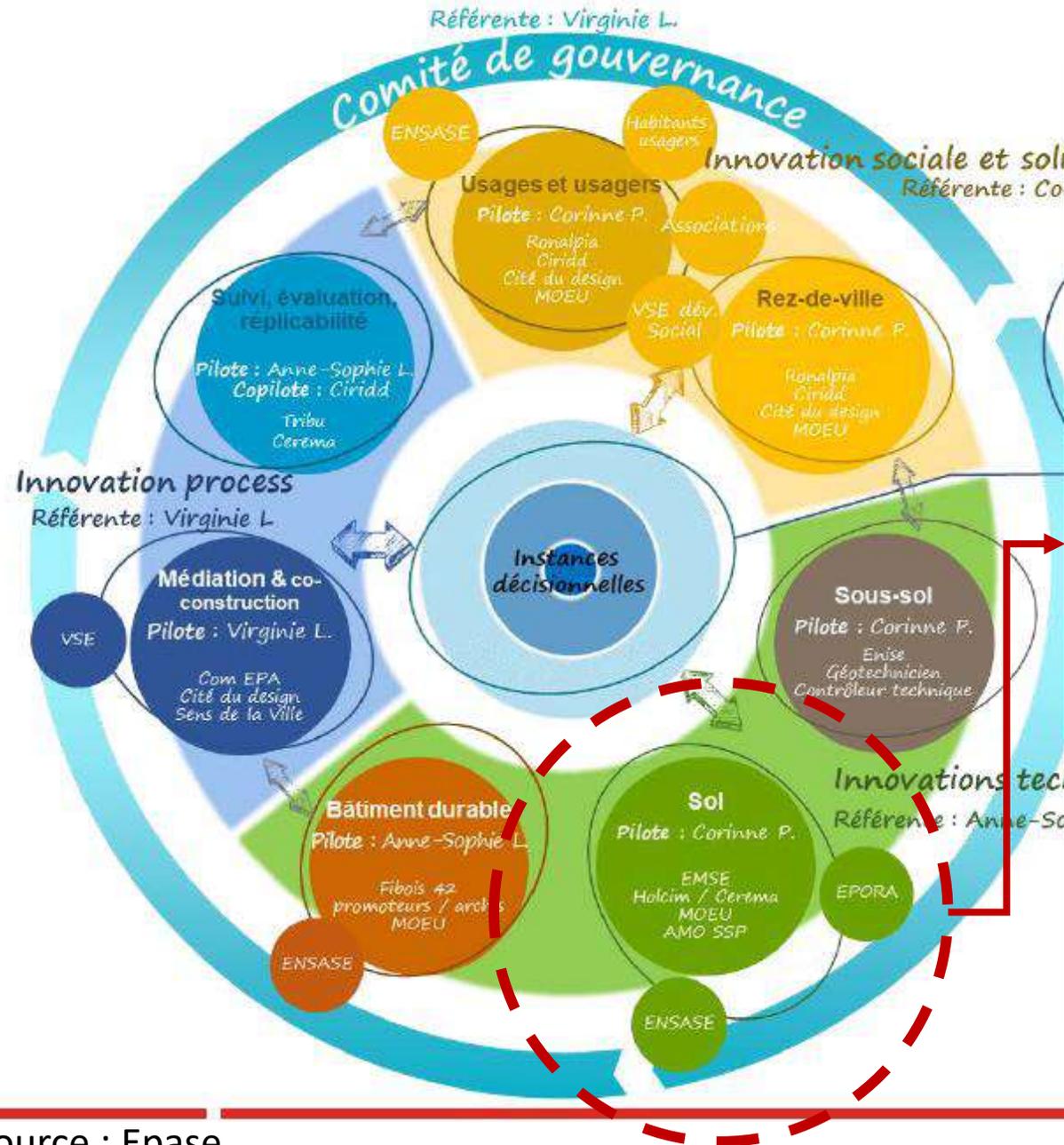
Approche bioindicateurs (communautés végétales)

Les plantes sont bavardes et parlent
continuellement de leur environnement ...
reste à comprendre ce qu'elles nous disent !

九 A ♀ غ 水 𐤀 Π 𐤁 𐤂*

* Recherche traducteur qui connaît le langage des plantes





Axe d'innovation sol (2023-2024)

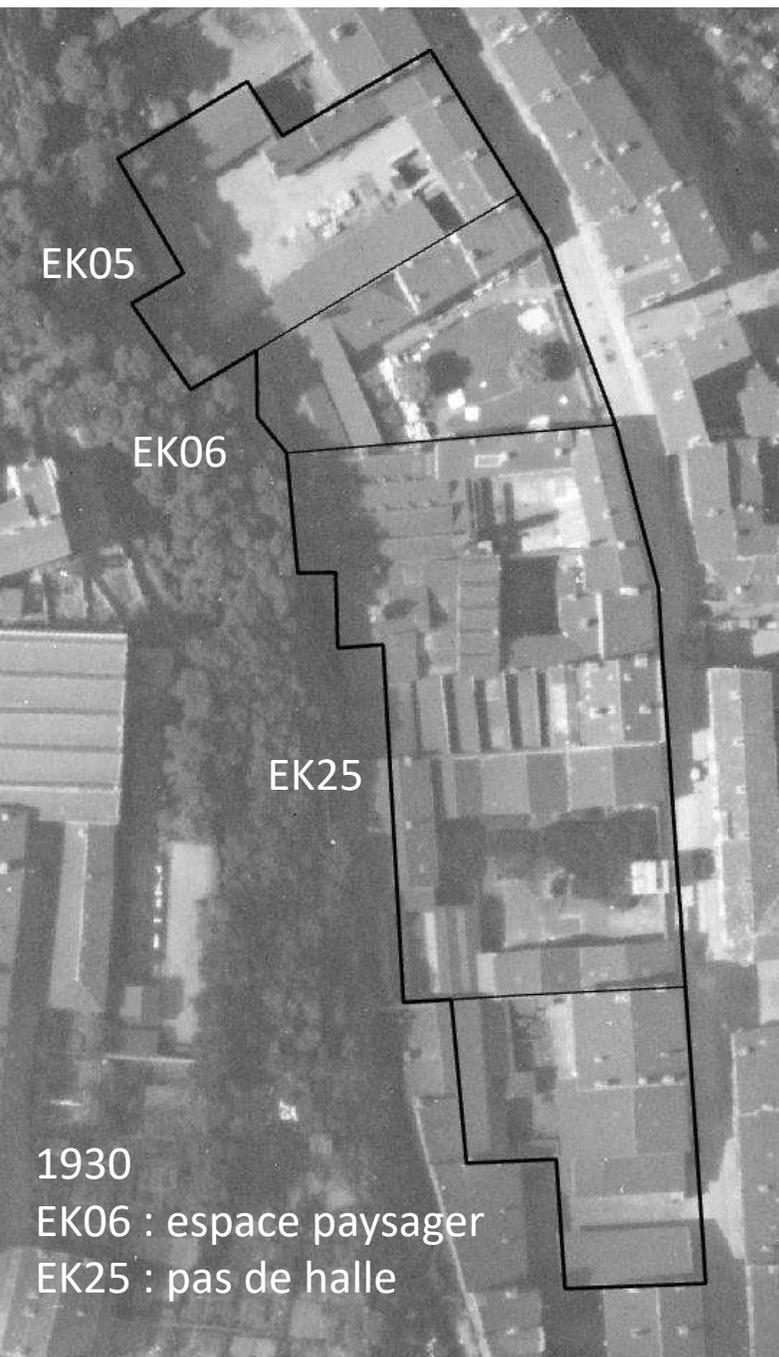
→ **Tâche 1** : Faire évoluer les pratiques actuelles de dépollution en tenant compte de la biodisponibilité des éléments dans le sol

- État de l'art (biodisponibilité)
- Diagnostic de contamination
- Caractérisation des transferts du sol vers le vivant
- Cartographies de recommandations pour l'aménagement futur (lieux favorables à de la culture en pleine terre, îlots de biodiversité, méthodologie SSP...)

→ **Tâche 2** : Envisager l'agriculture en pleine terre sur Neyron

- Cultures potagères
- Analyse des cultures
- Sciences participatives (Compostond, Amicale laïque du Crêt de Roch, ...)
- Préconisations pour la reconstitution d'un sol fertile





EK05

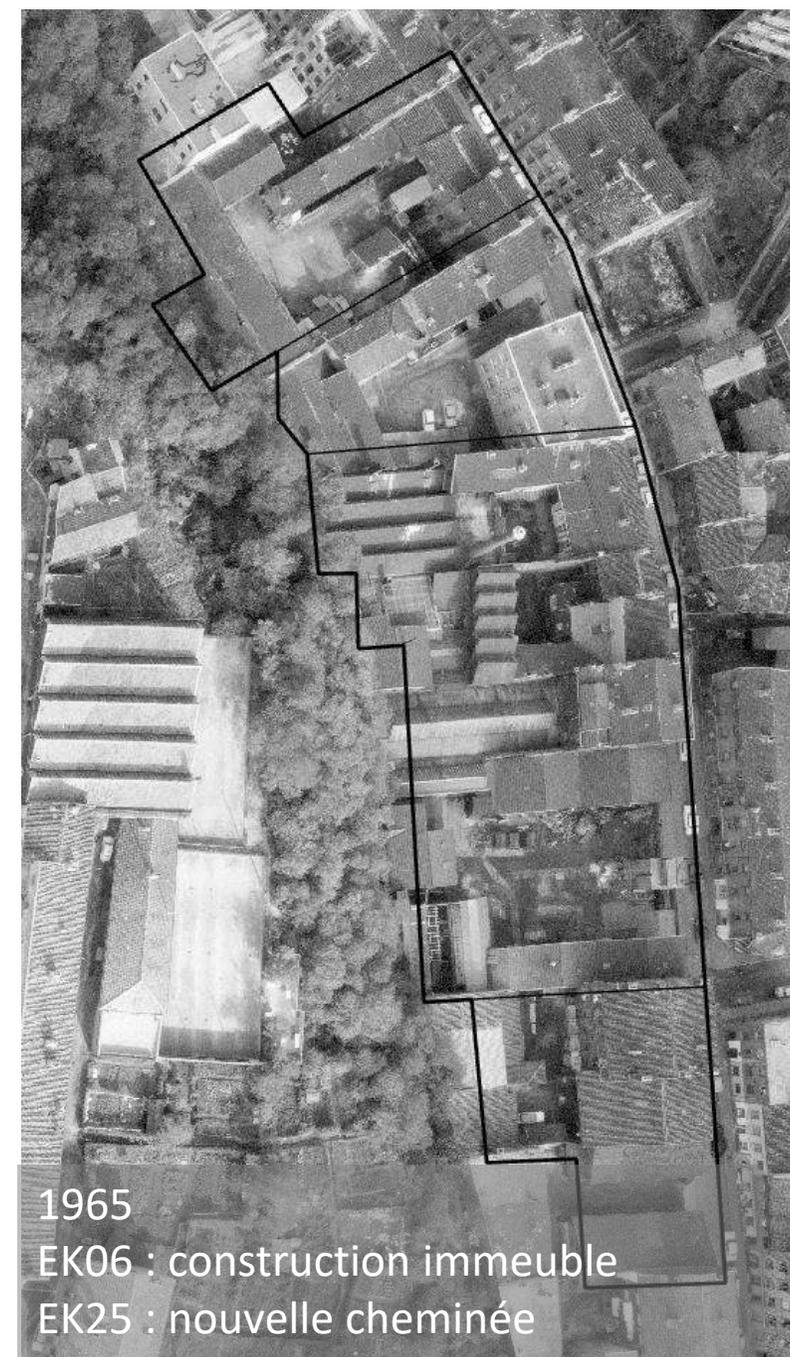
EK06

EK25

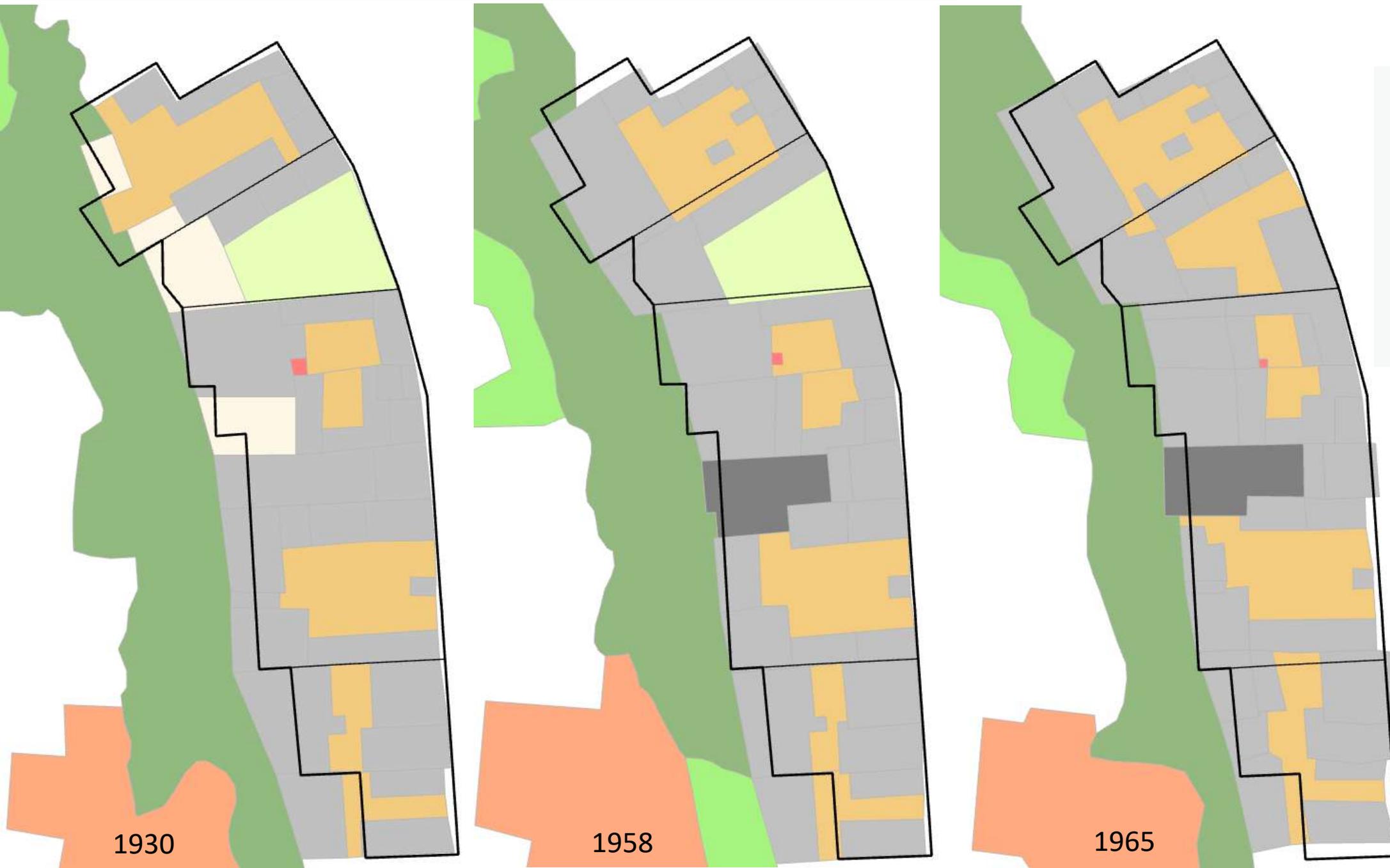
1930
EK06 : espace paysager
EK25 : pas de halle



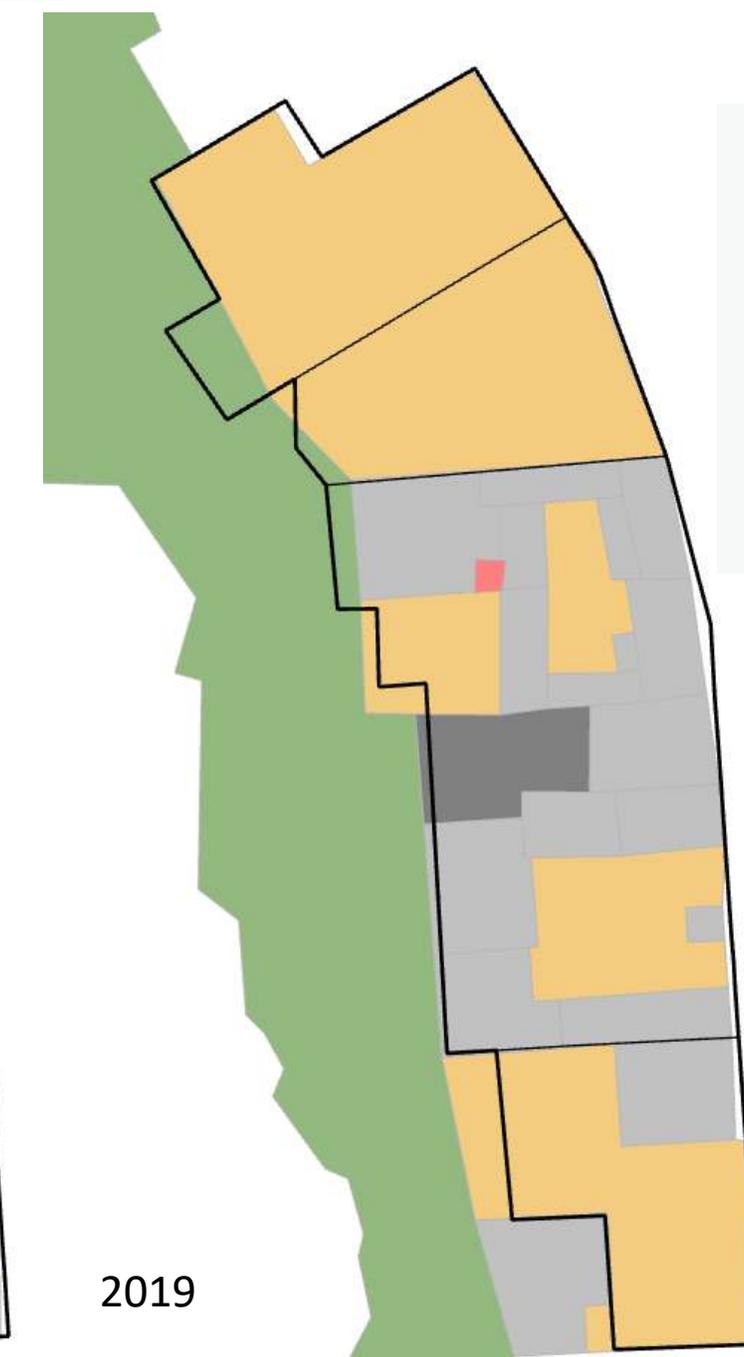
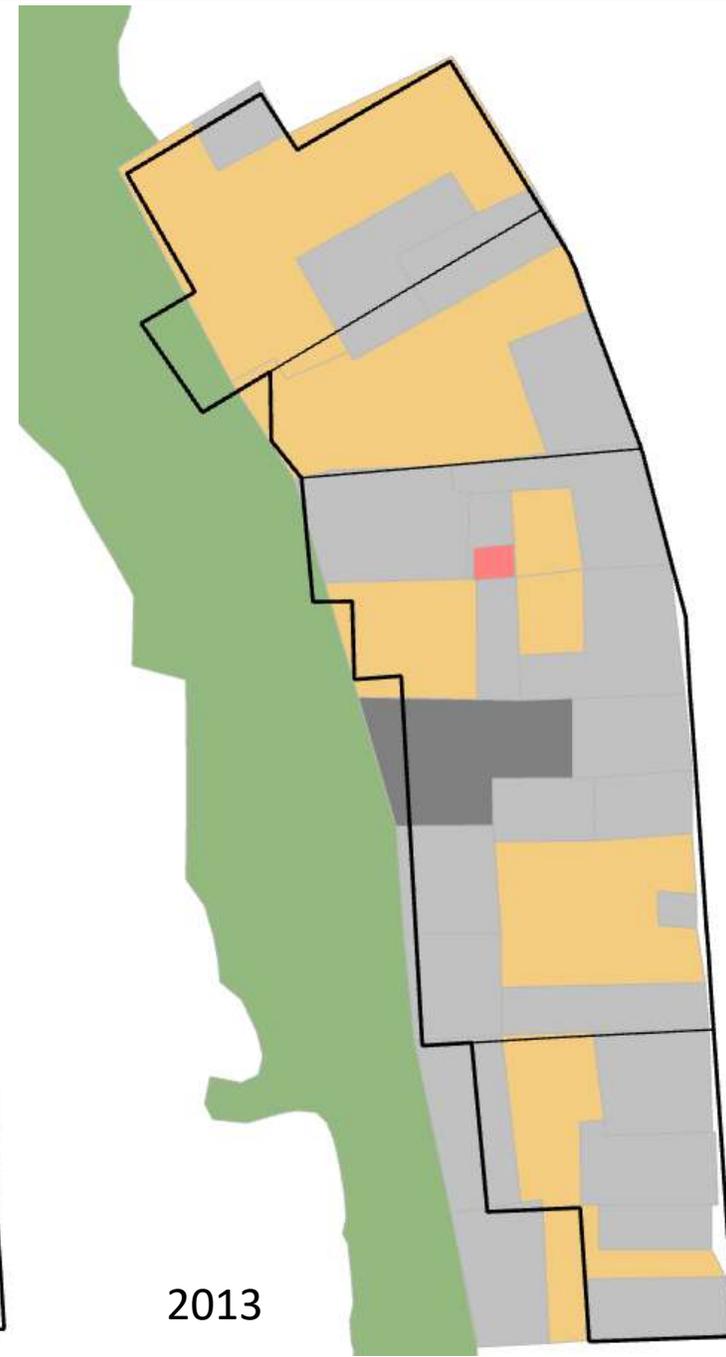
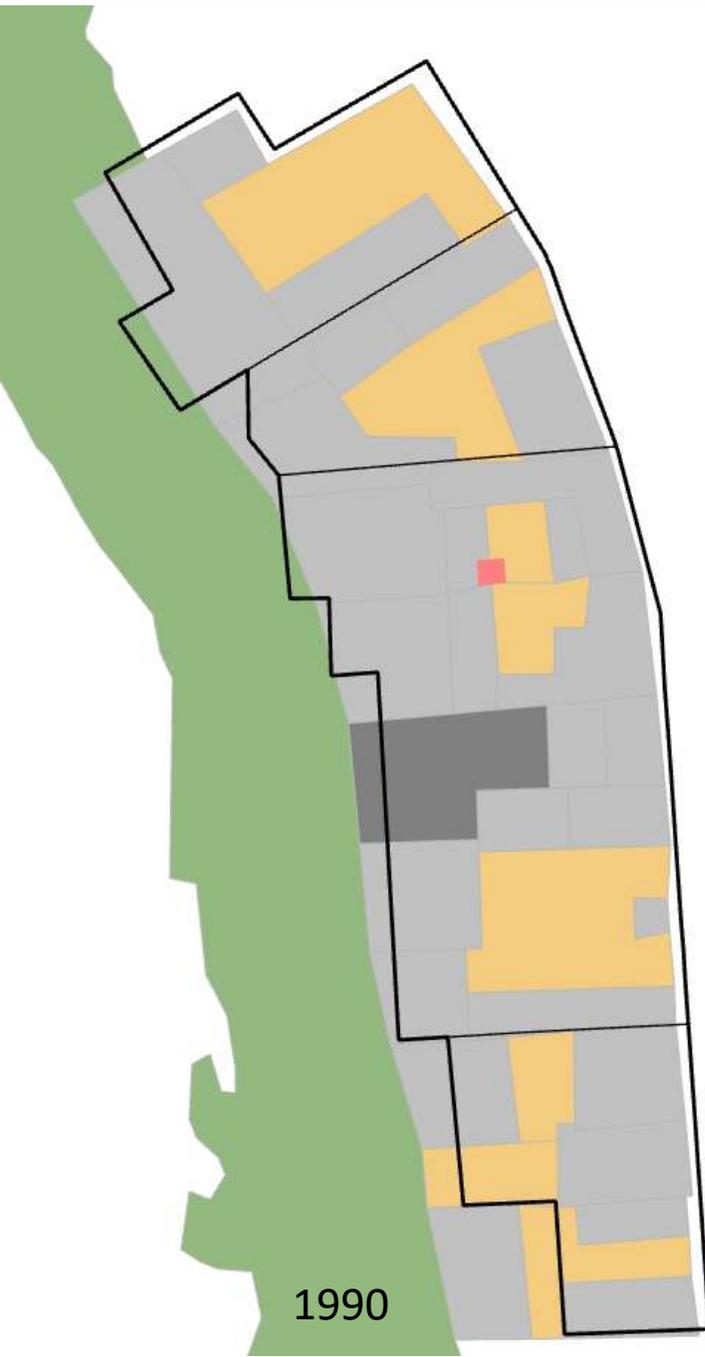
1958
EK05 : nouveaux bâtiments
EK06 : espace paysager
EK25 : halle construite

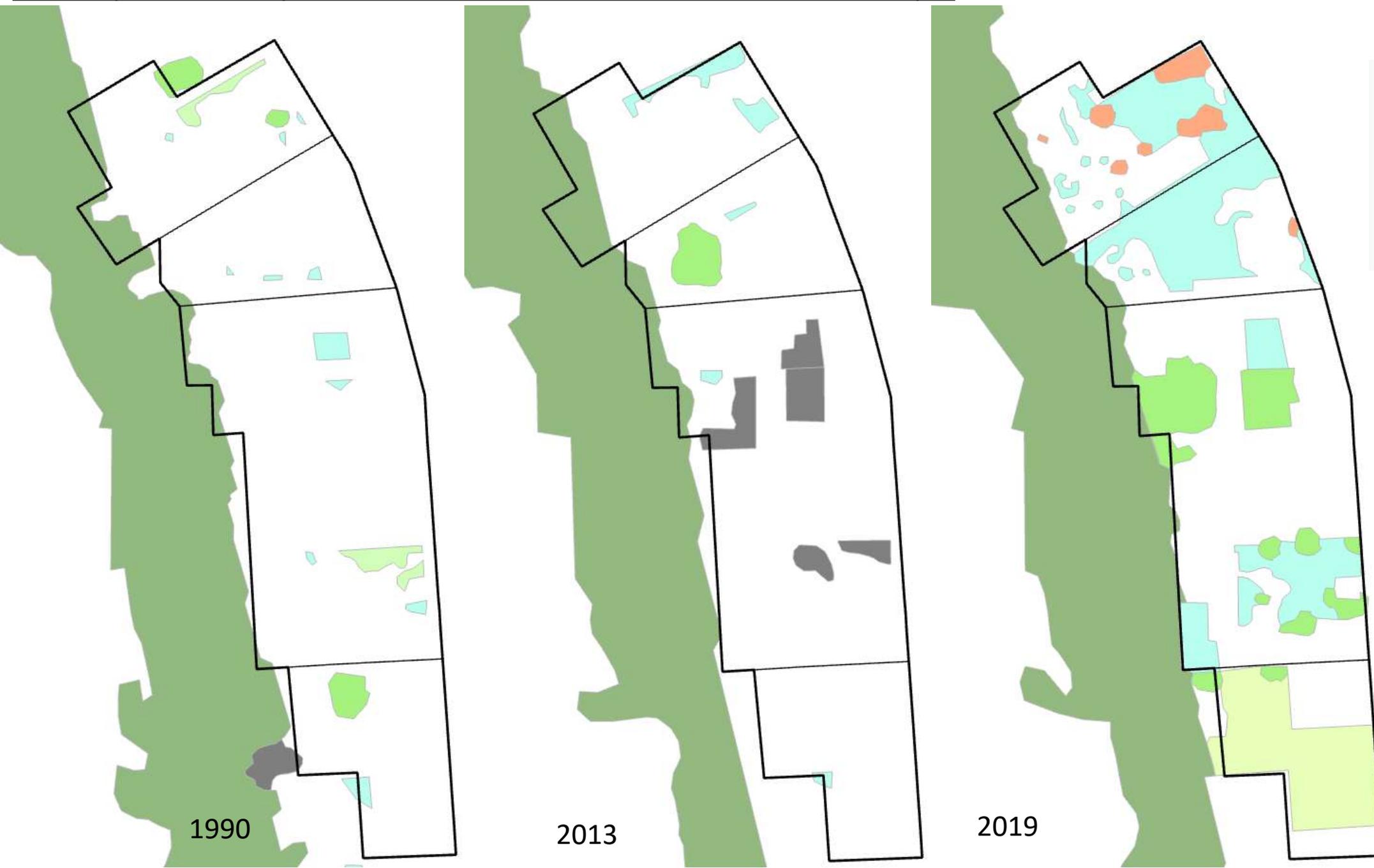


1965
EK06 : construction immeuble
EK25 : nouvelle cheminée





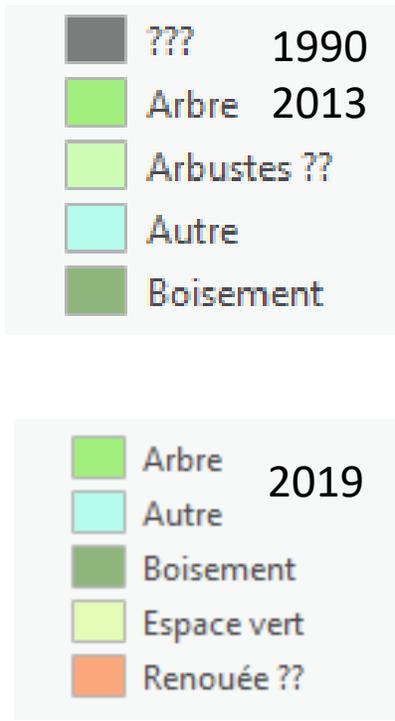




1990

2013

2019



Historique du site : photo aériennes (source Google map)



Activités sur le site au fil du temps (Tesora, 2022) :

EK05

- Entre 2 guerres : ?
- 1951 à 1996 : fabrication cycles et traitement de surface
- 1996 à 2012 : garage automobile

EK06

- Entre 2 guerres : zone de bureaux ou d'habitation ?
- À partir des années 1960 : immeuble d'habitation + garages de stationnement

EK25

- Entre 2 guerres : fabrication pièces détachées de cycle et de tête de gaine pour obus
- Après guerres : fabrication de pièces métalliques (poids lourds, constructions métalliques et électriques)

Compte tenu des activités des pollutions multiples mais probablement différentes sont attendues sur chaque parcelle :

- métaux
- hydrocarbures
- ...

2020
EK05 : ferme des renouées
EK25 : destruction des bâtiments

Tâche 1 - Méthodologie pour l'étude des transferts : stratégie d'échantillonnage

Caractérisation des teneurs en éléments métalliques



Site Neyron

Plantes
feuilles

Pool
(5 sp.)

Phytodisponibilité

Sols



Teneurs superficielles
(<15 cm)

< 2 mm

Teneurs totales

! en cours d'analyse !

et

disponibilité
environnementale

Teneurs en profondeurs
(0-1 m)

< 2 mm

Teneurs totales
(Tesora)

Échantillonnage de terrain : sols et plantes

1/550^e



92 plantes MSE

- Pools ●
- Renouée ●
- Buddleja ●

77 sols MSE ▲
86 sols TESORA +

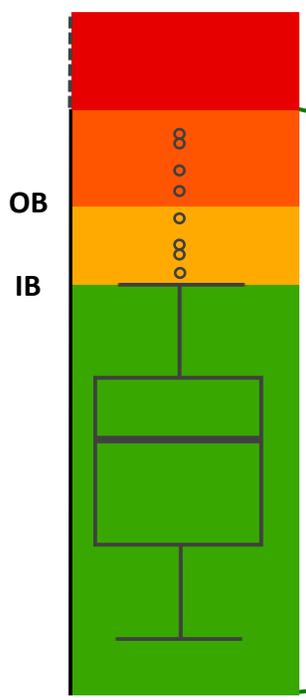
Distribution spatiale des échantillons de sols et de plantes

Calcul des seuils pour la caractérisation des anomalies : utilisation des bases de données disponibles

Quelles sont les teneurs habituelles en éléments métalliques sur des sites non contaminés (sols et plantes) ?
Et comment établir des seuils de contamination (anomalies) ? Approche par "boxplot".

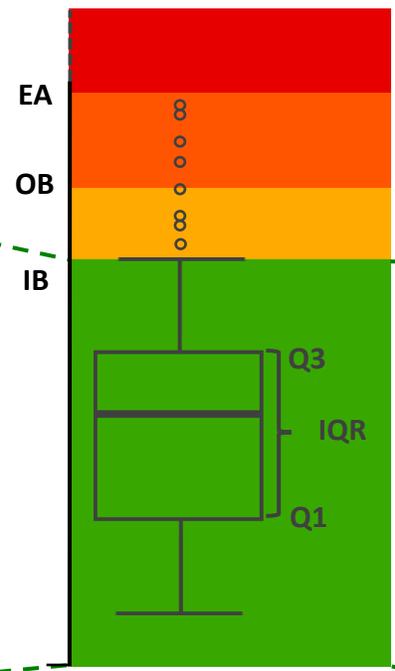
Disponibilité environnementale

Seuils calculés à partir des données du projet "Bio indicateur" (ADEME)



Teneurs totales

Seuils calculés à partir de la MNSSP



Anomalies extrêmes (non naturelles)

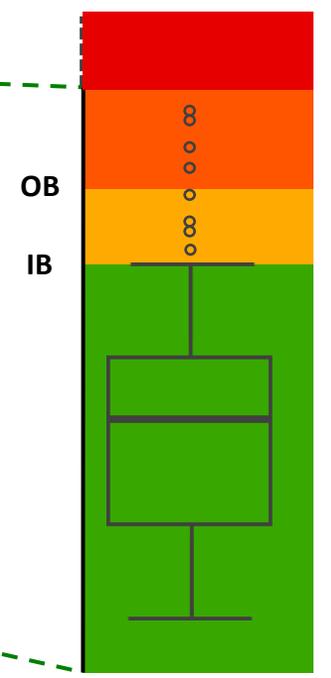
Fortes anomalies naturelles

Anomalies modérées naturelles

Gamme des teneurs naturelles habituelles

Phytodisponibilité

Seuils calculés à partir des données du projet "Bio indicateur" (ADEME)



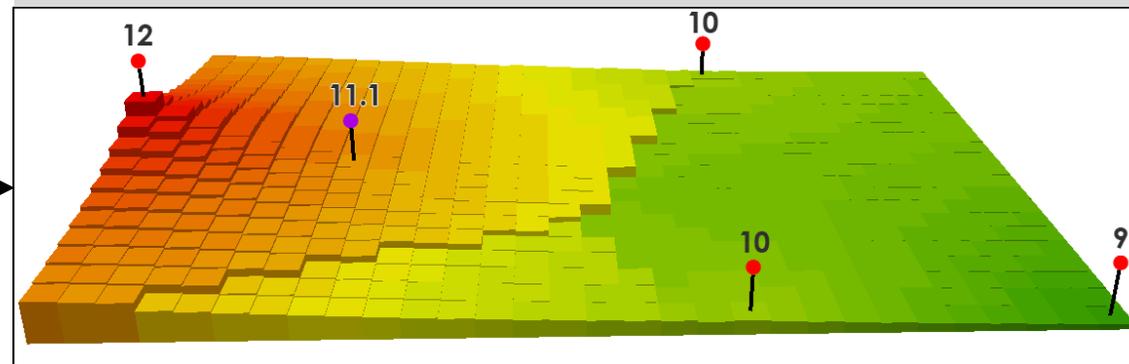
- IQR : distance inter quartile(Q3 - Q1)
- Q1 : premier quartile
- Q3 : troisième quartile
- IB : frontière interne(Q3 + 1,5 x IQR)
- OB : Frontière externe(Q3 + 3 x IQR)
- EA : Valeurs extrêmes du jeu de données (MNSSP)

D'autres jeu de données de référence pour les teneurs totales peuvent être utilisés (ex: BDSolU, fond géochimique local...)

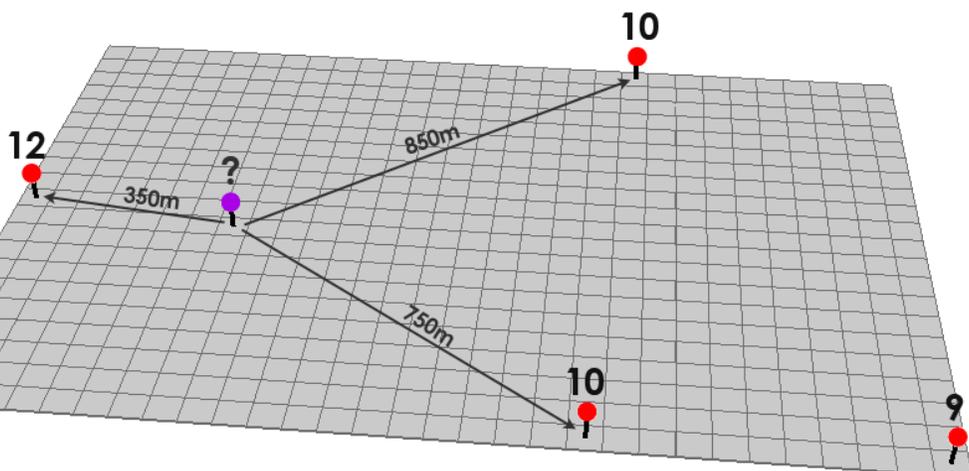
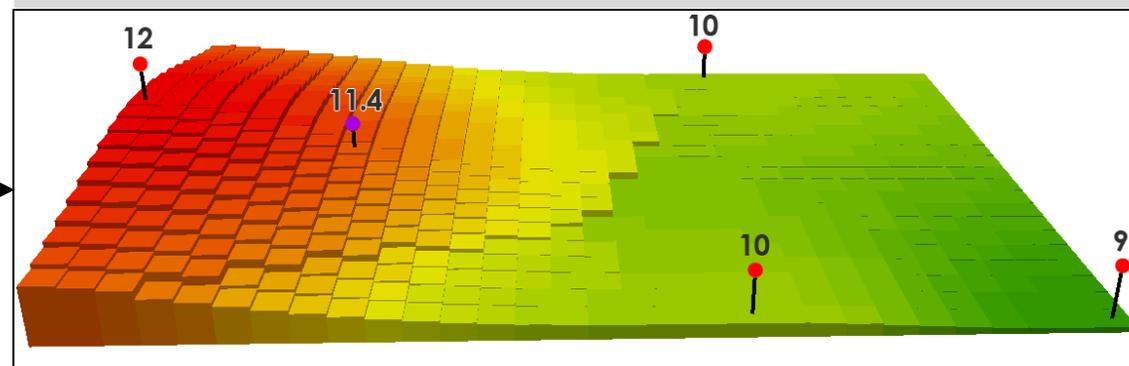
Méthode d'interpolation spatiale : inverse d'une puissance de la distance (*Inverse Distance Weighting Interpolation - IDW*)

Cartographie des données

Inverse de la distance : puissance 1



Inverse de la distance : puissance 2



Z_i : valeurs mesurées

D_i : distance entre les valeurs mesurées

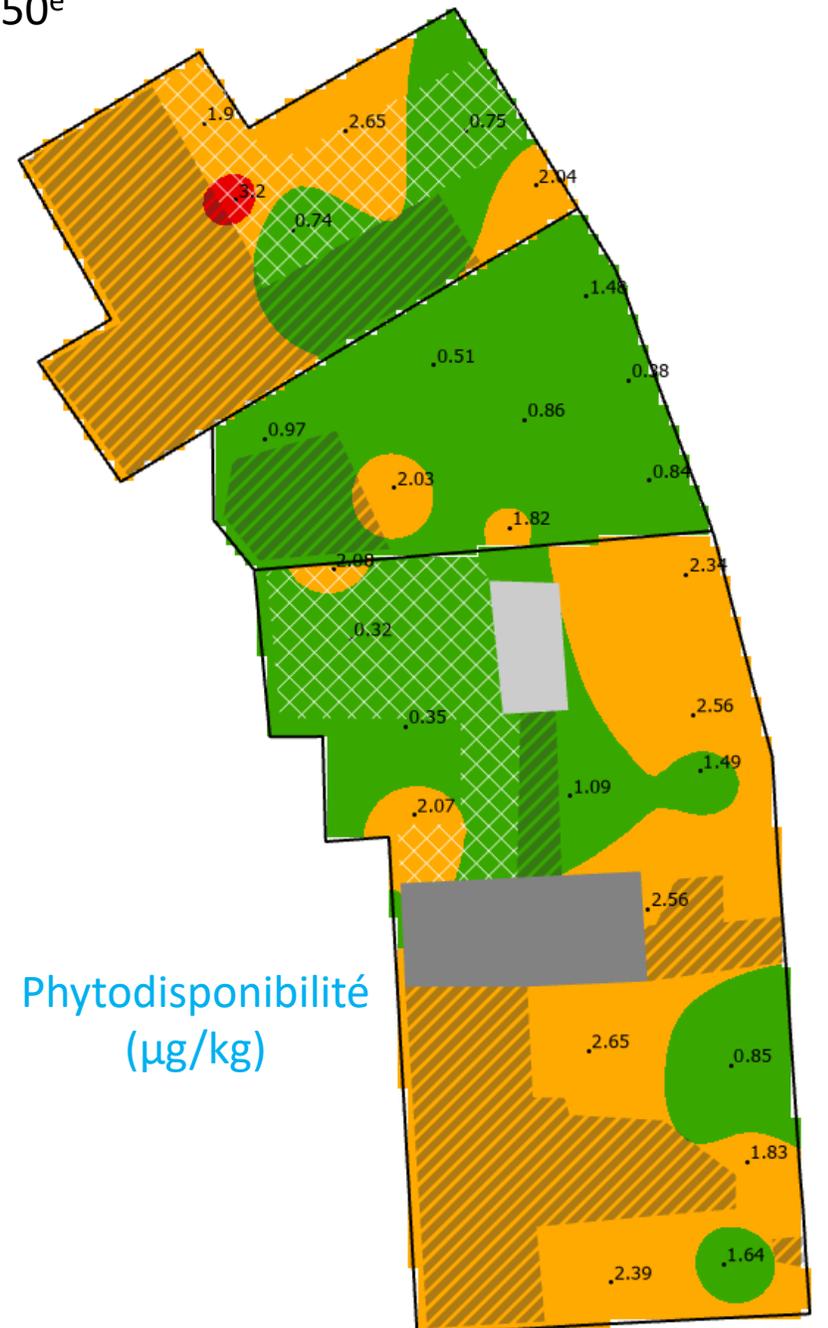
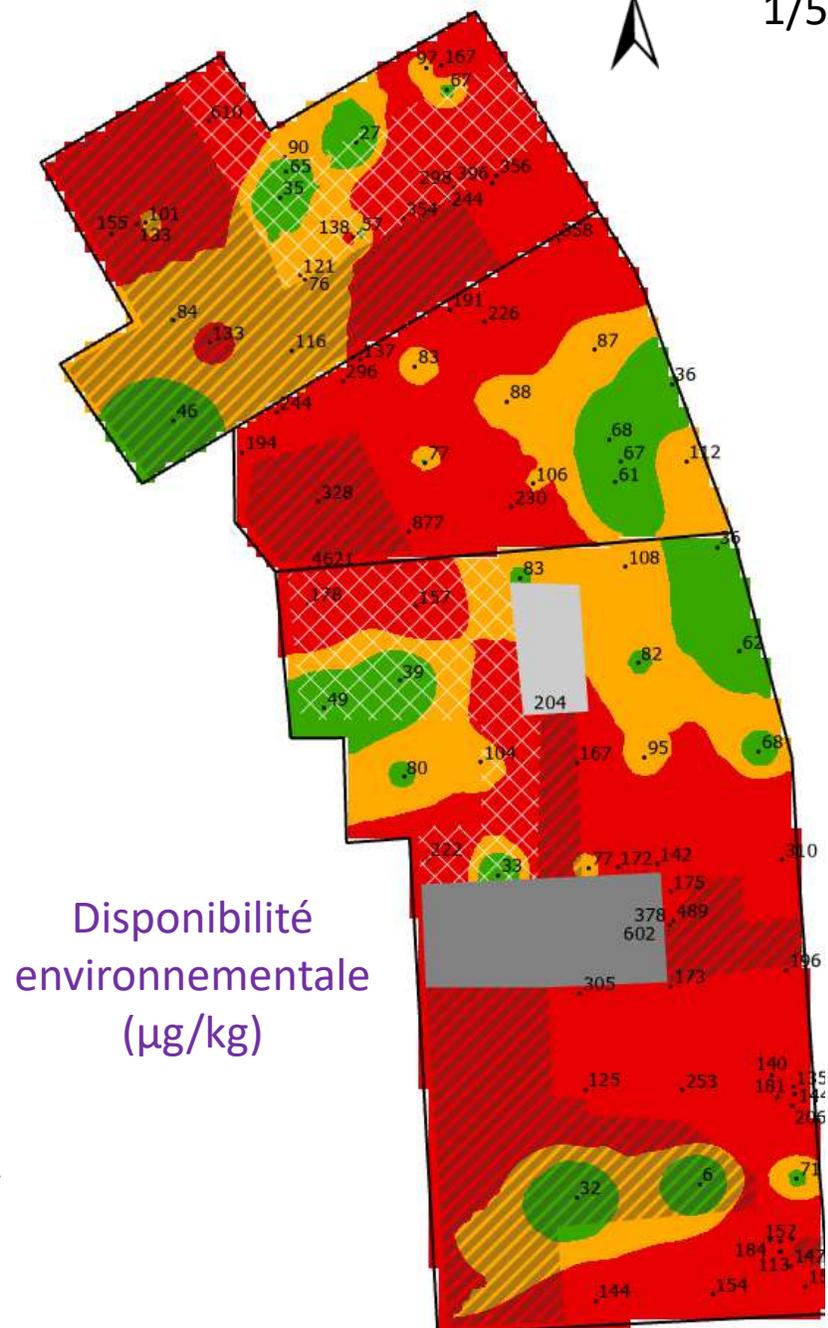
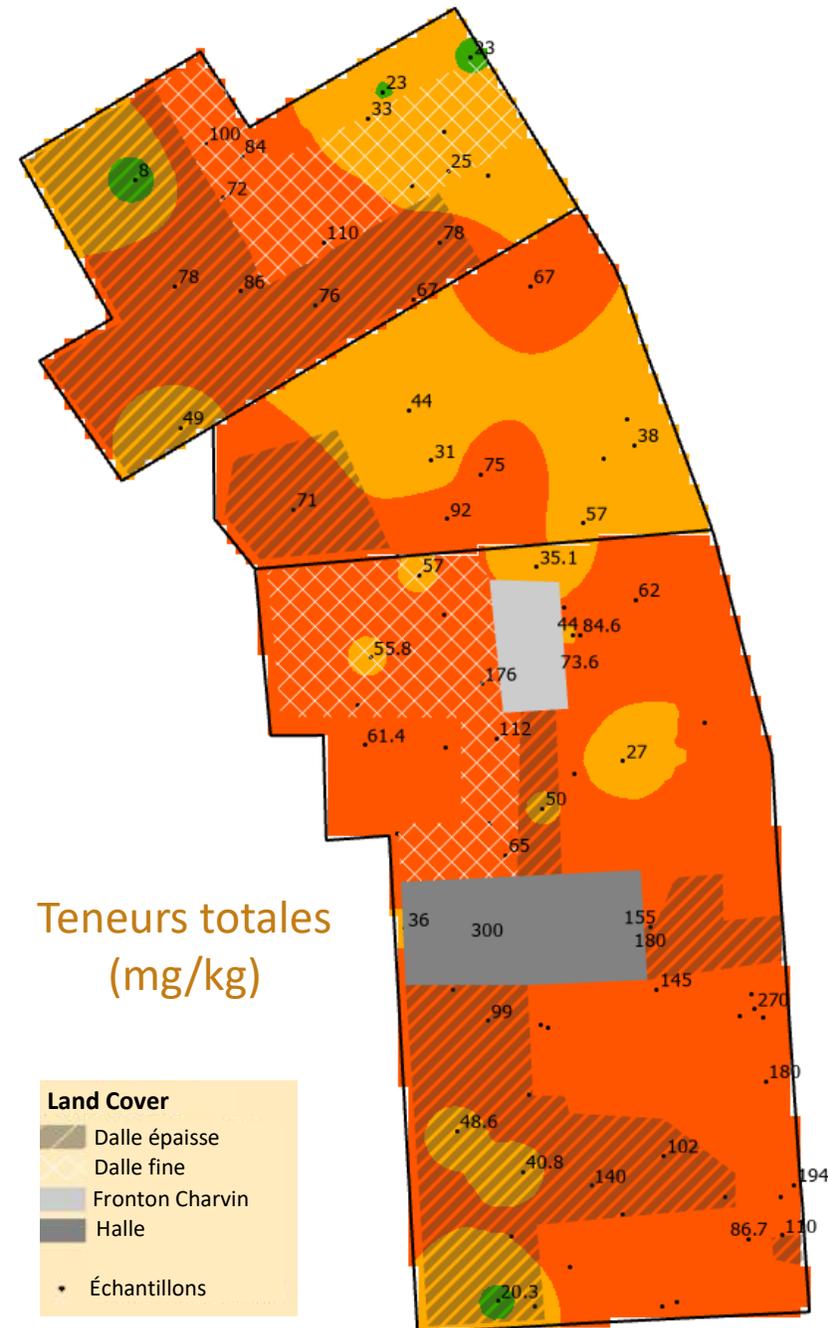
Z_p : valeur calculée

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)}$$

Cartes des teneurs en Arsenic (As)

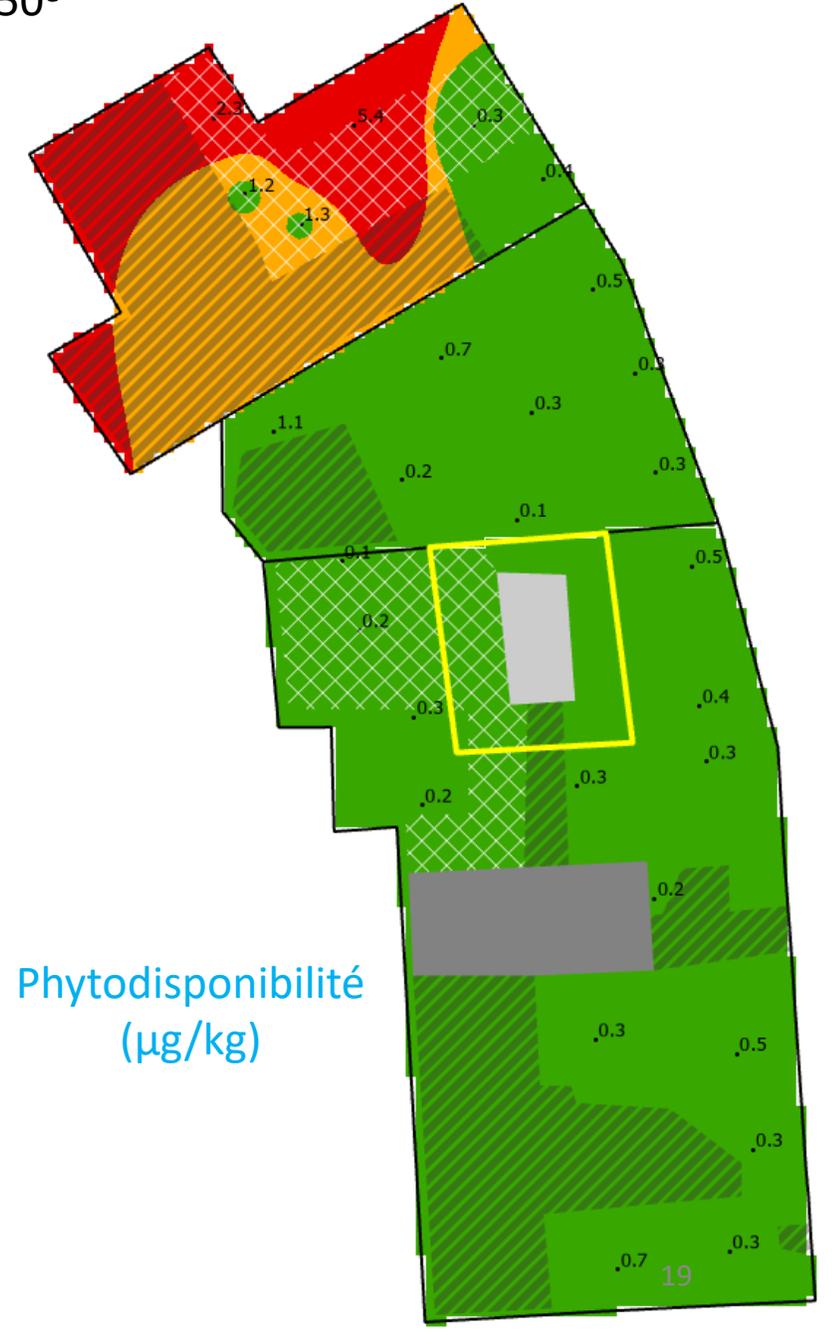
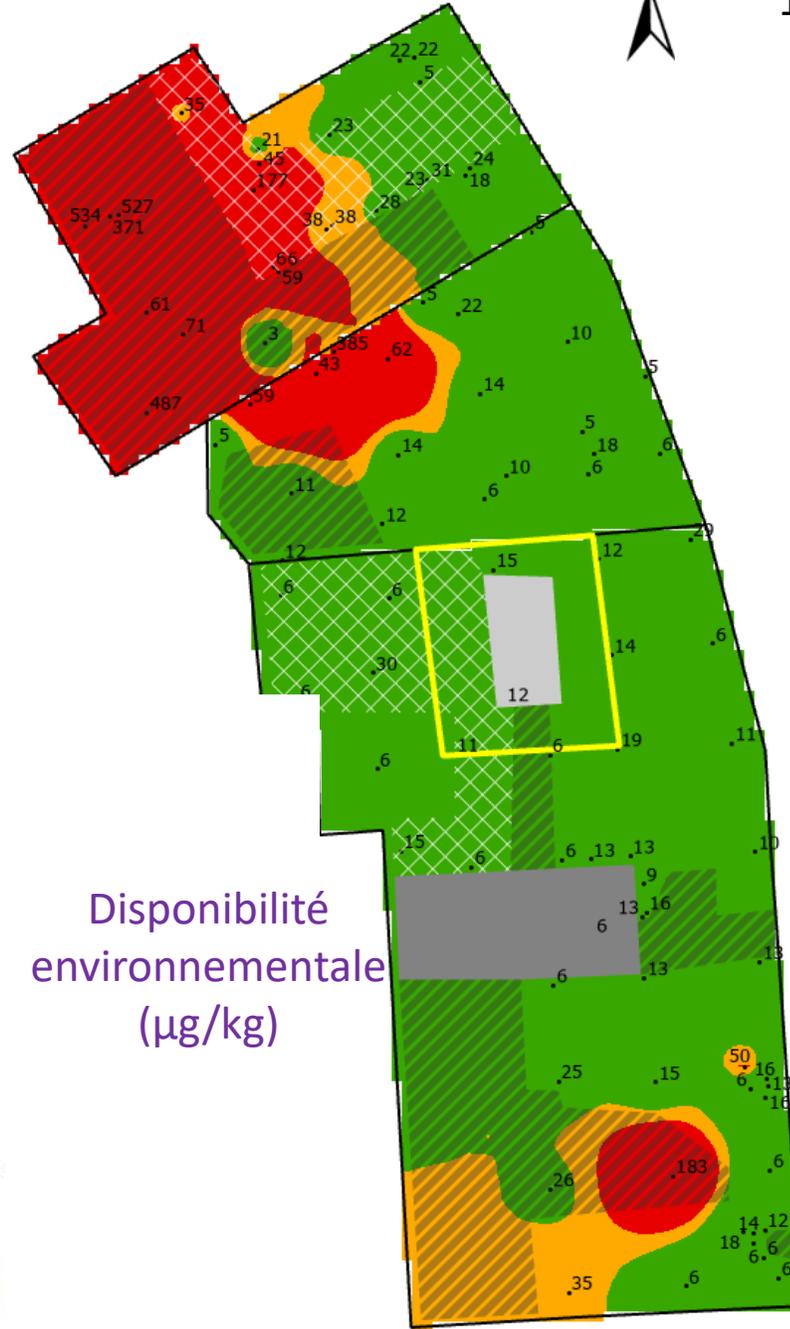
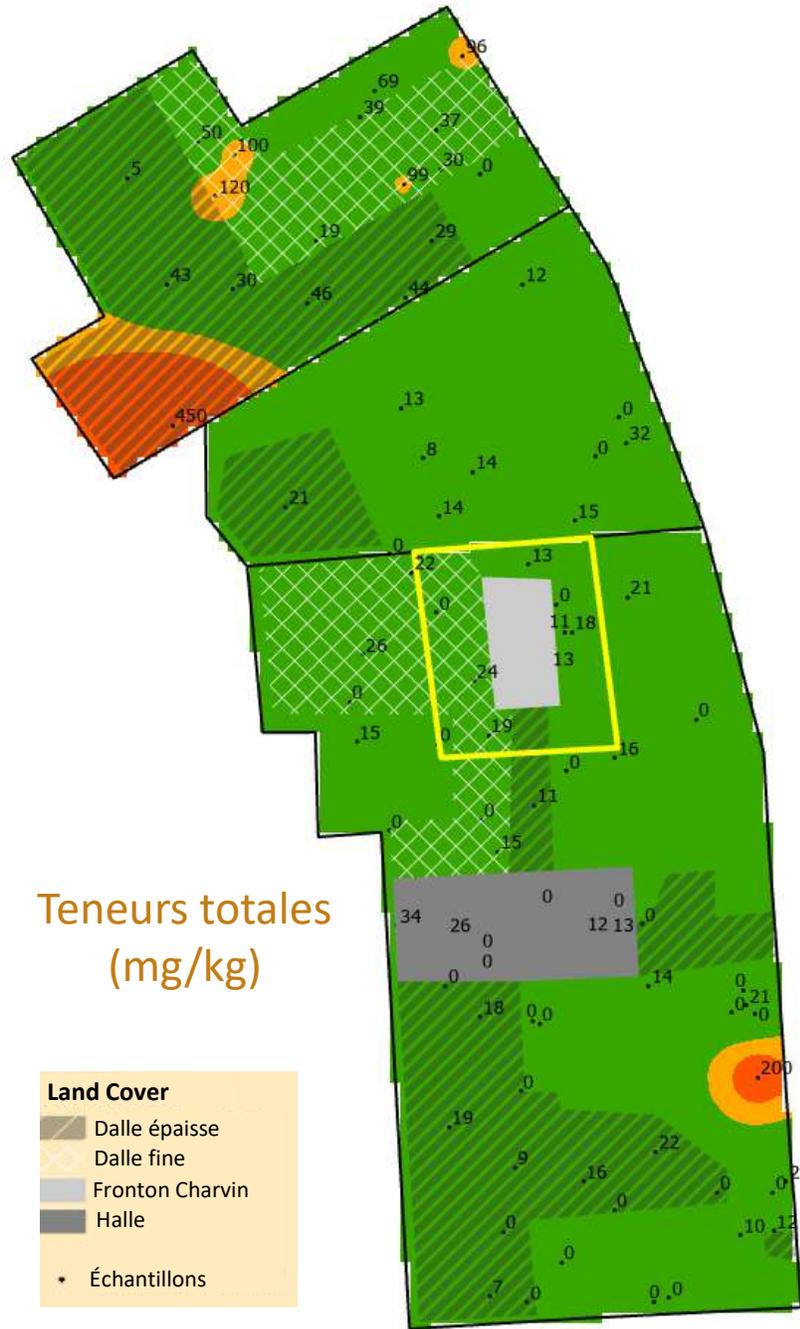


1/550^e



Cartes des teneurs en Chrome (Cr)

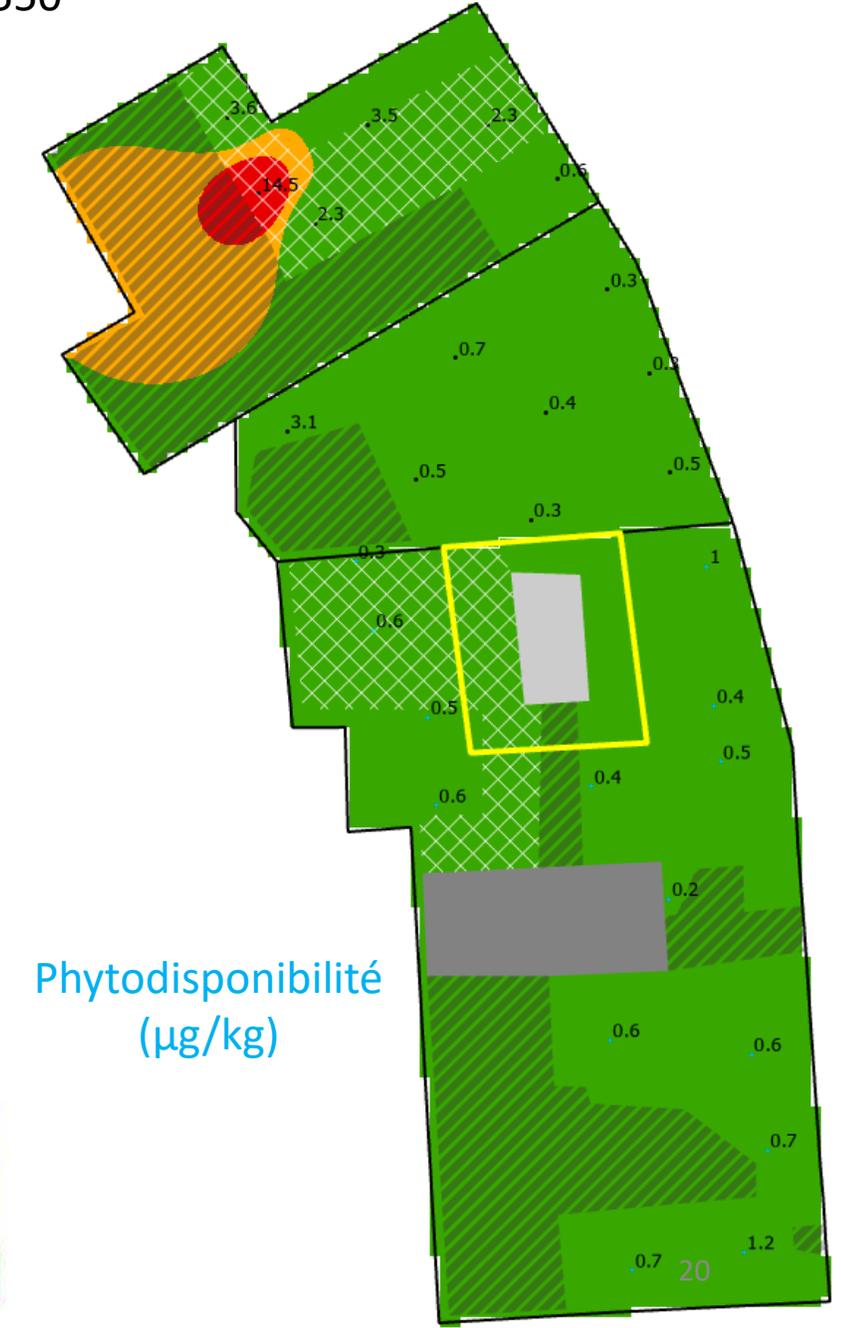
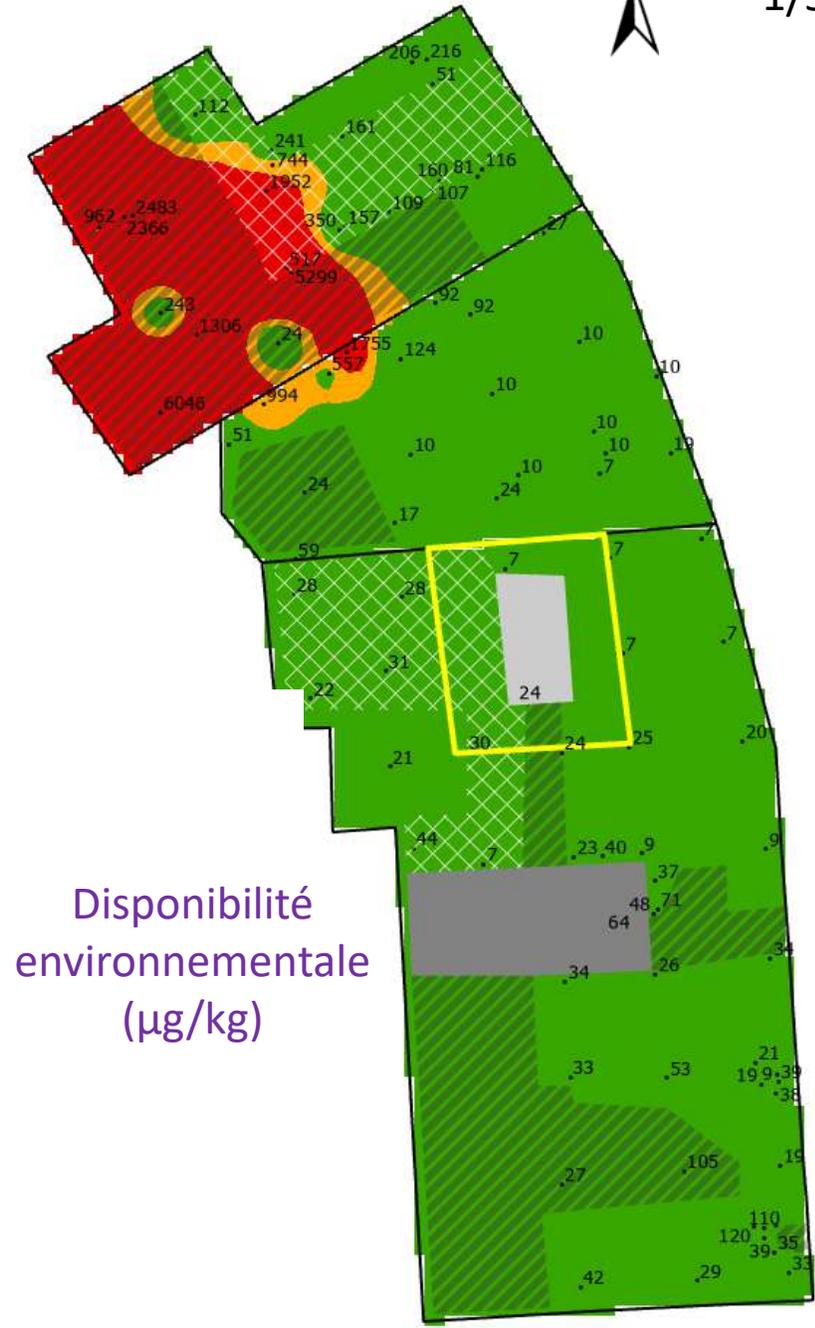
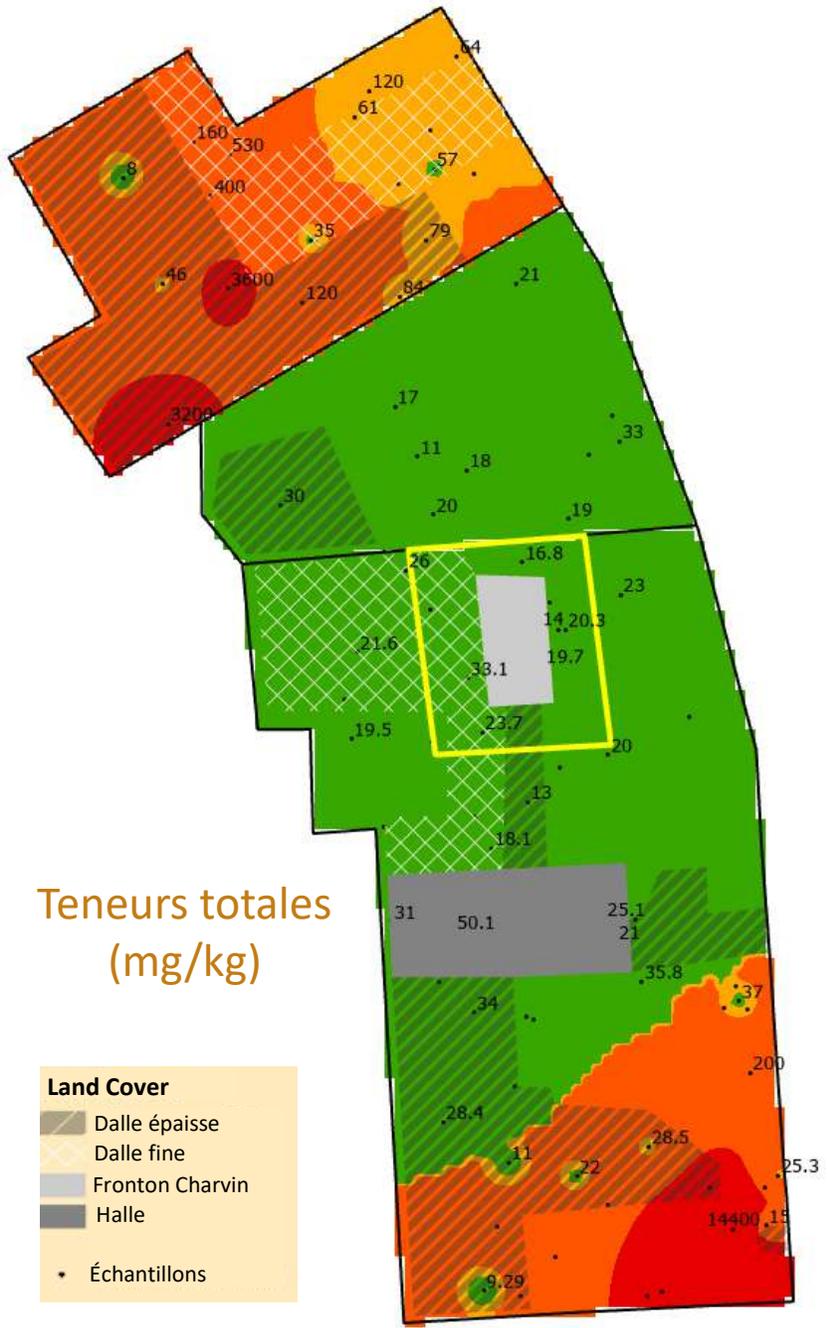
1/550^e



Cartes des teneurs en Nickel (Ni)

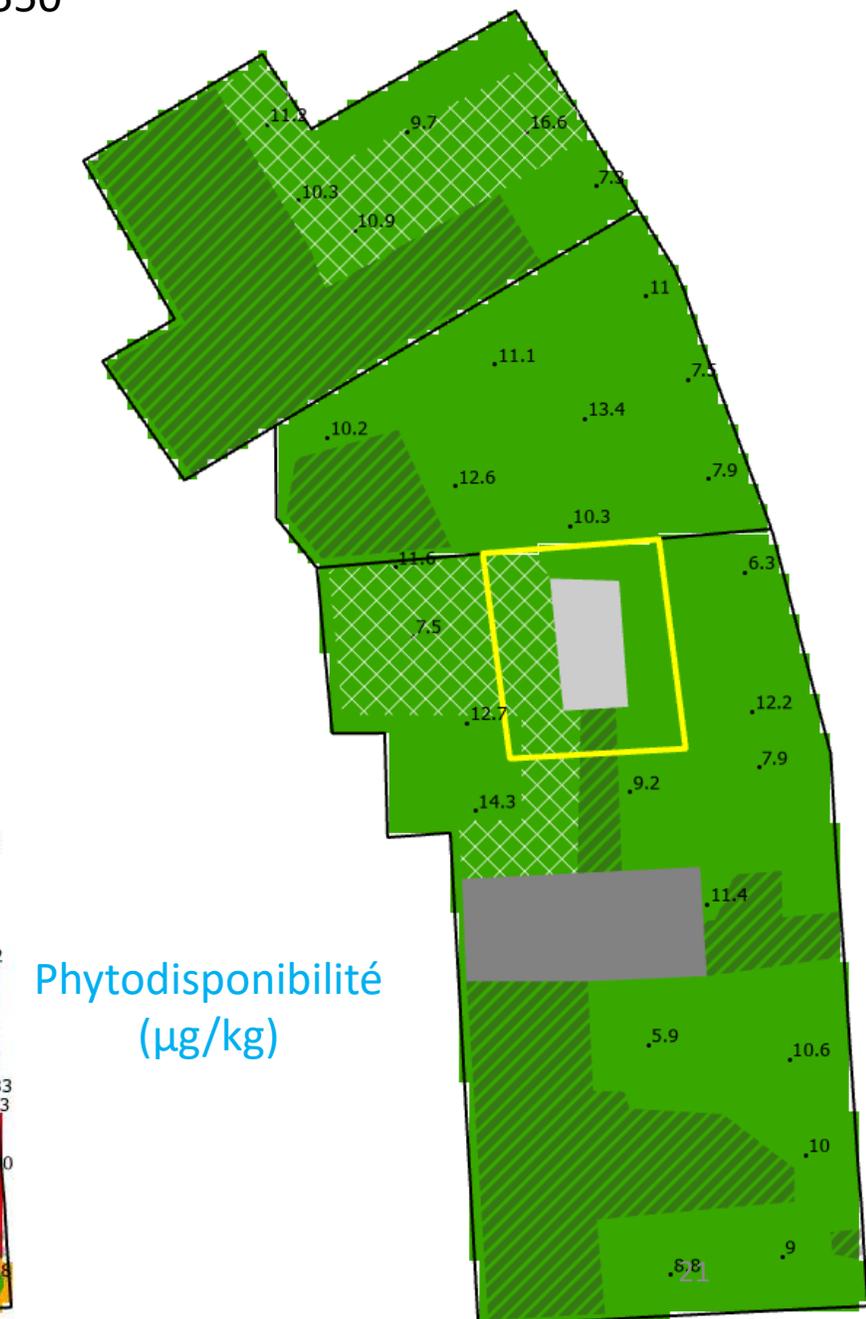
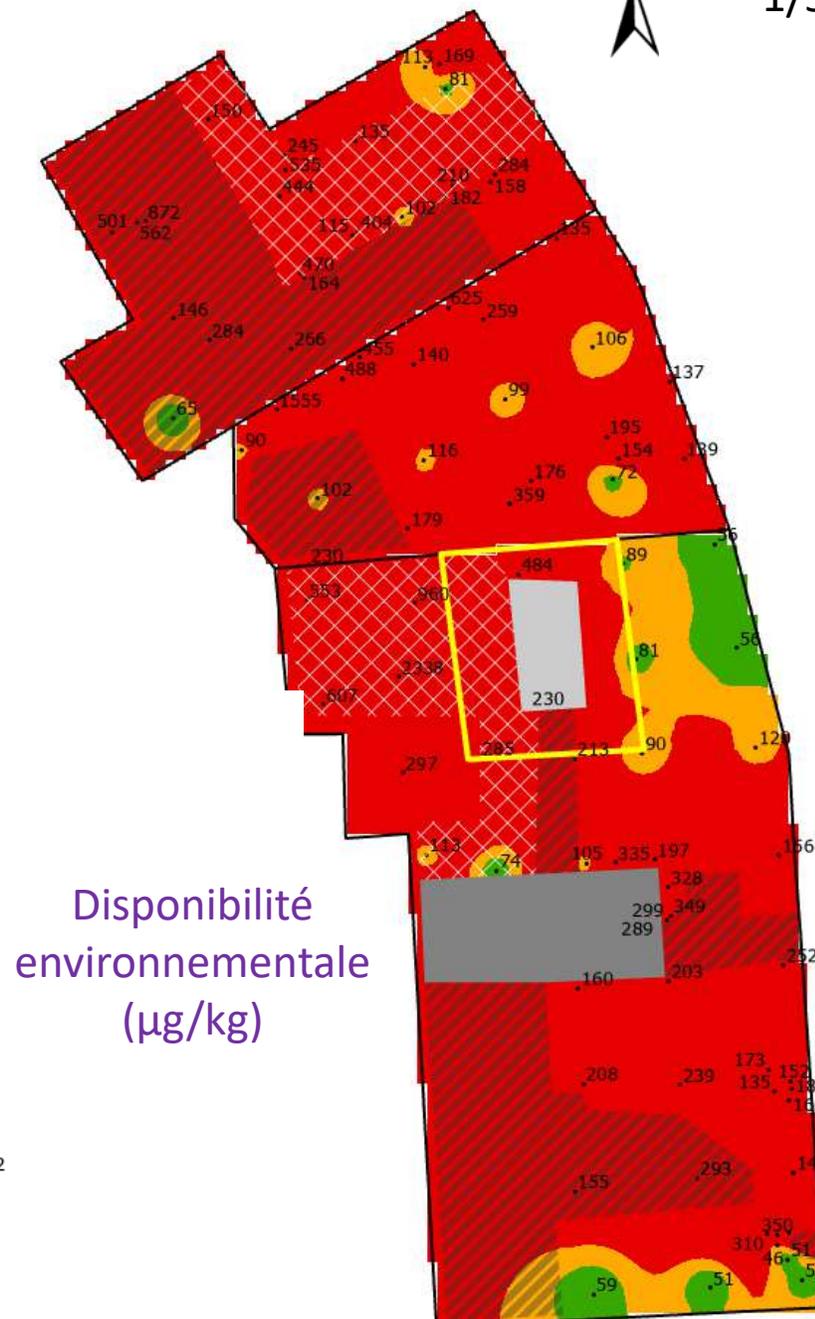
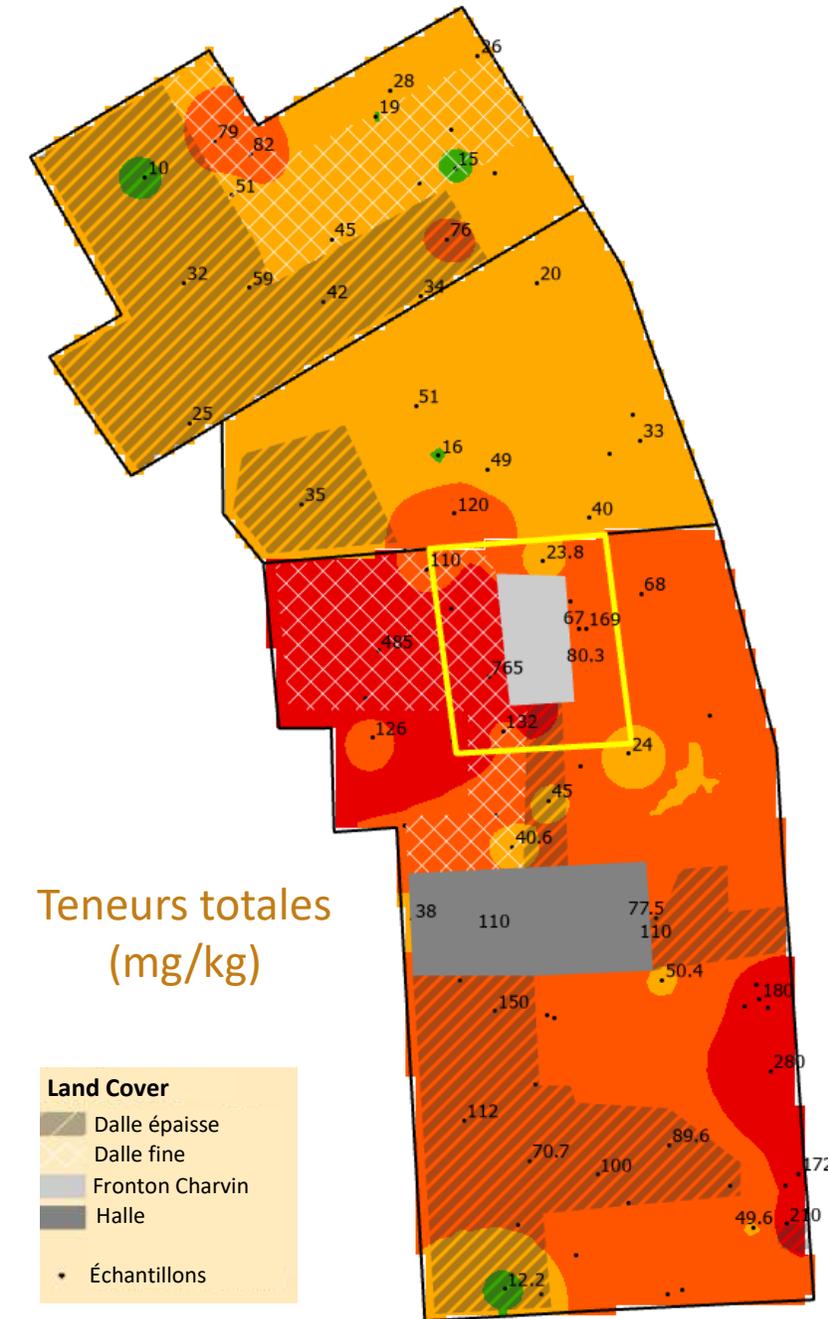


1/550^e



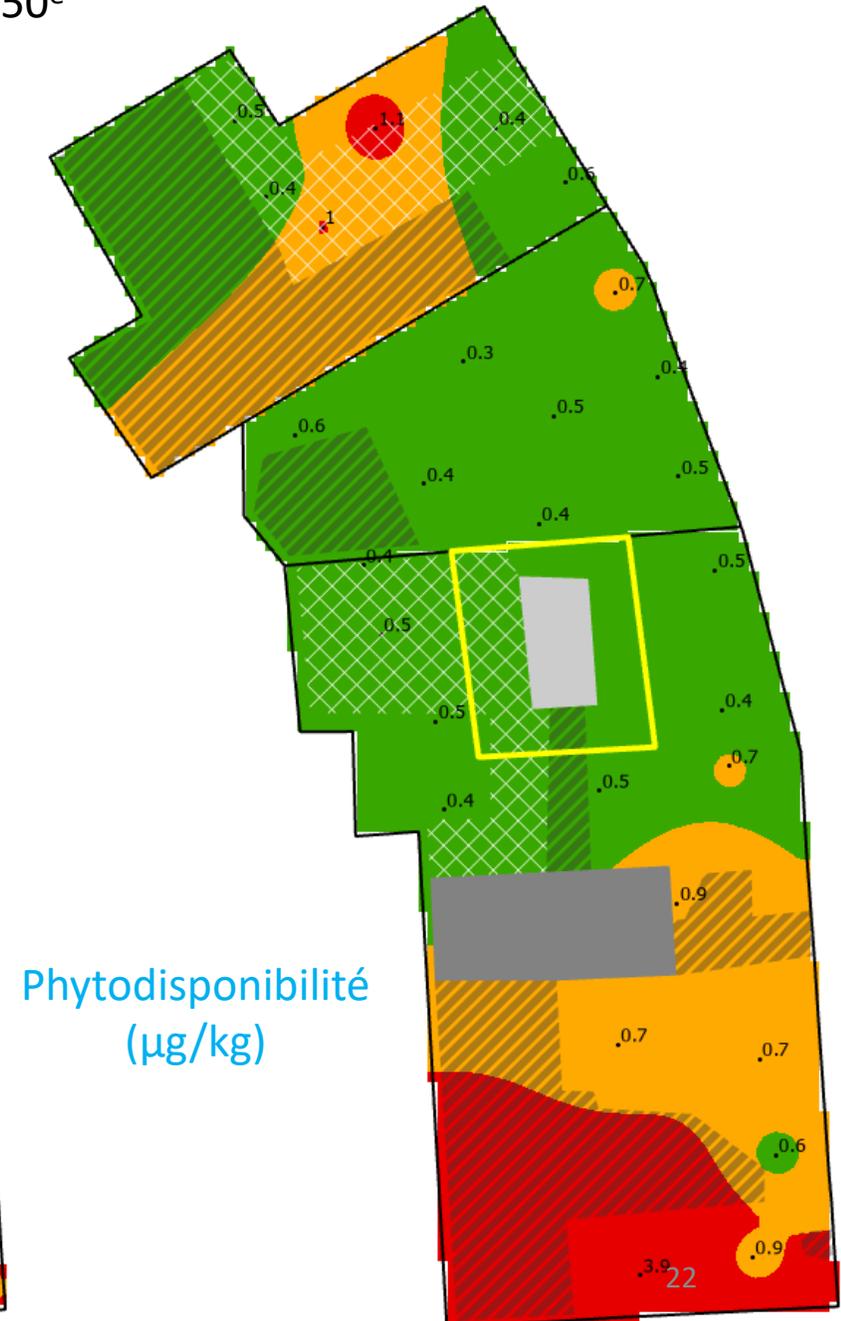
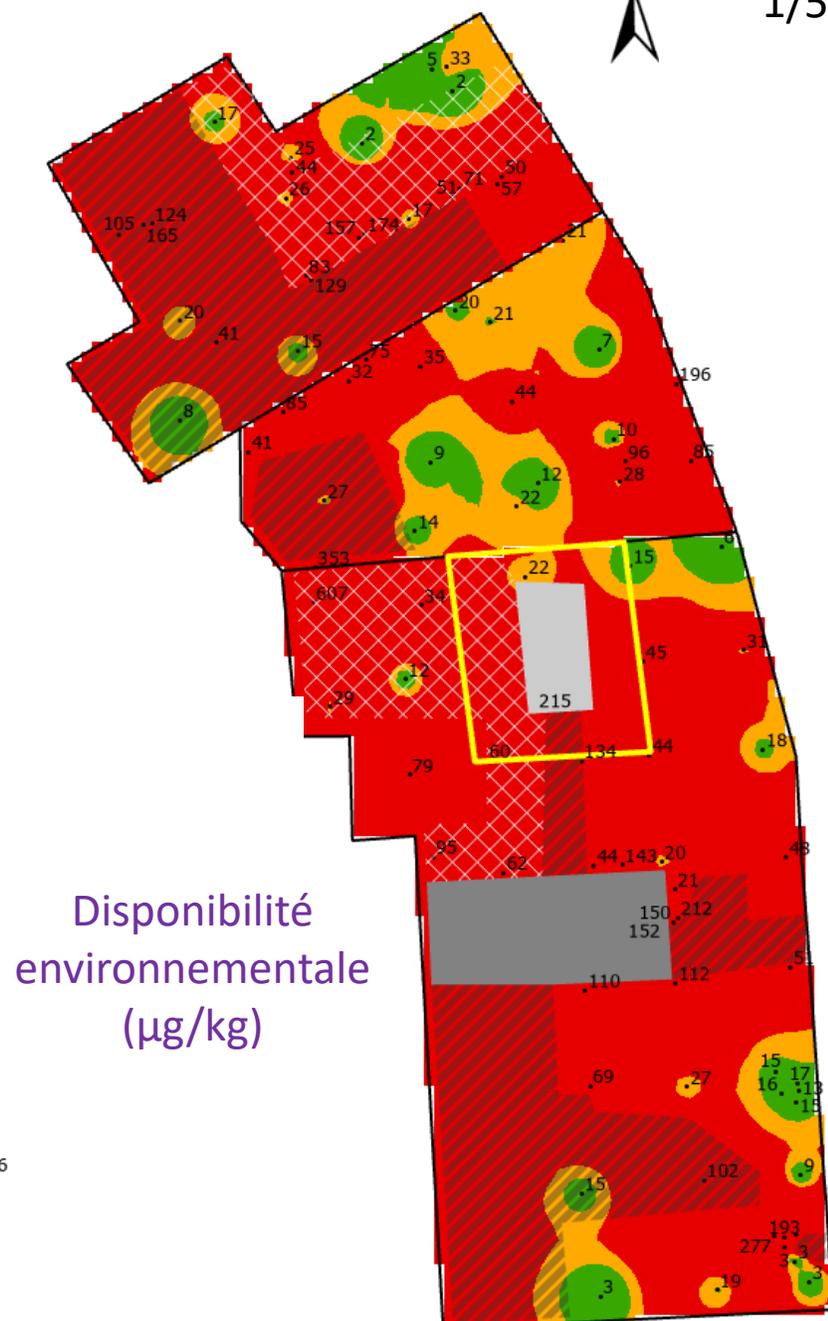
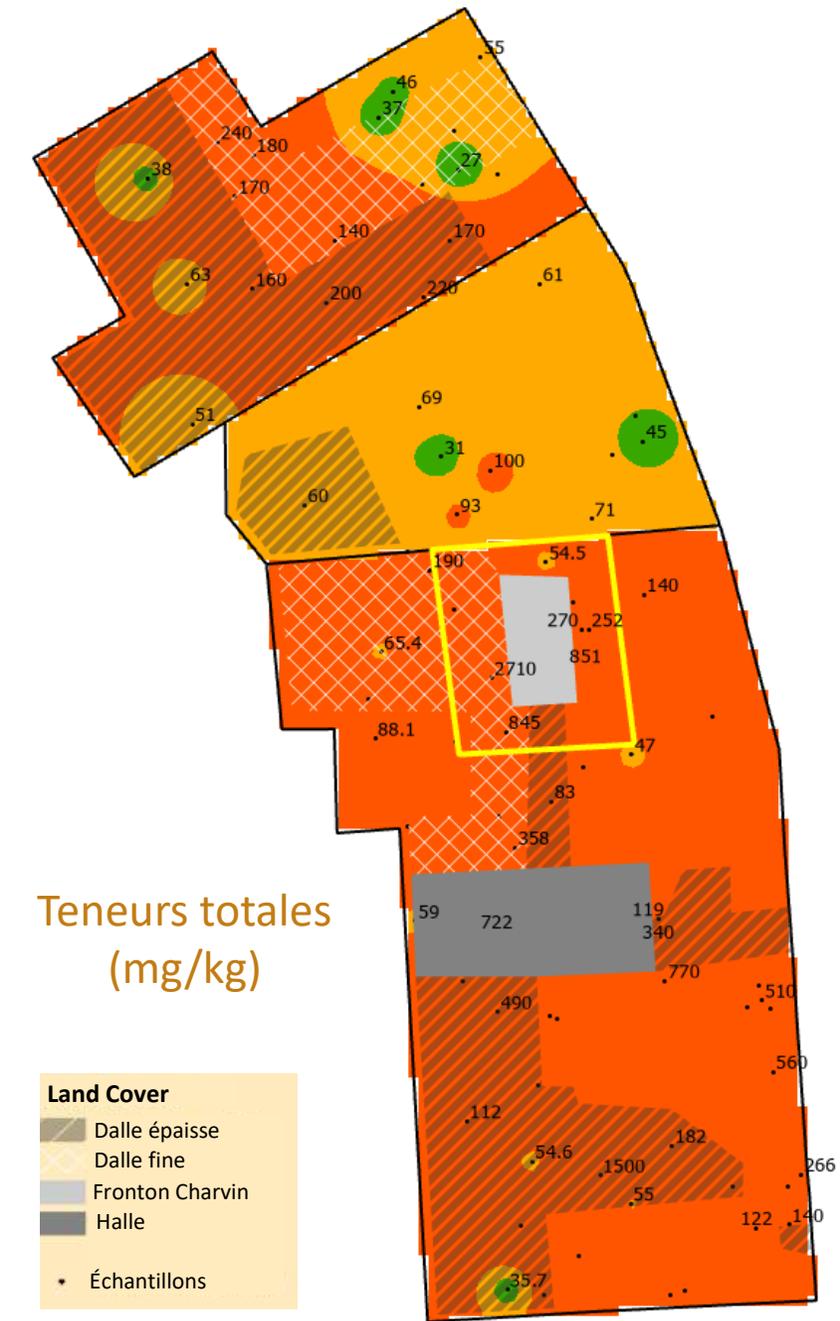
Cartes des teneurs en Cuivre (Cu)

1/550^e



Cartes des teneurs en Plomb (Pb)

1/550^e



Cartes des teneurs en Arsenic (As)



1/550^e

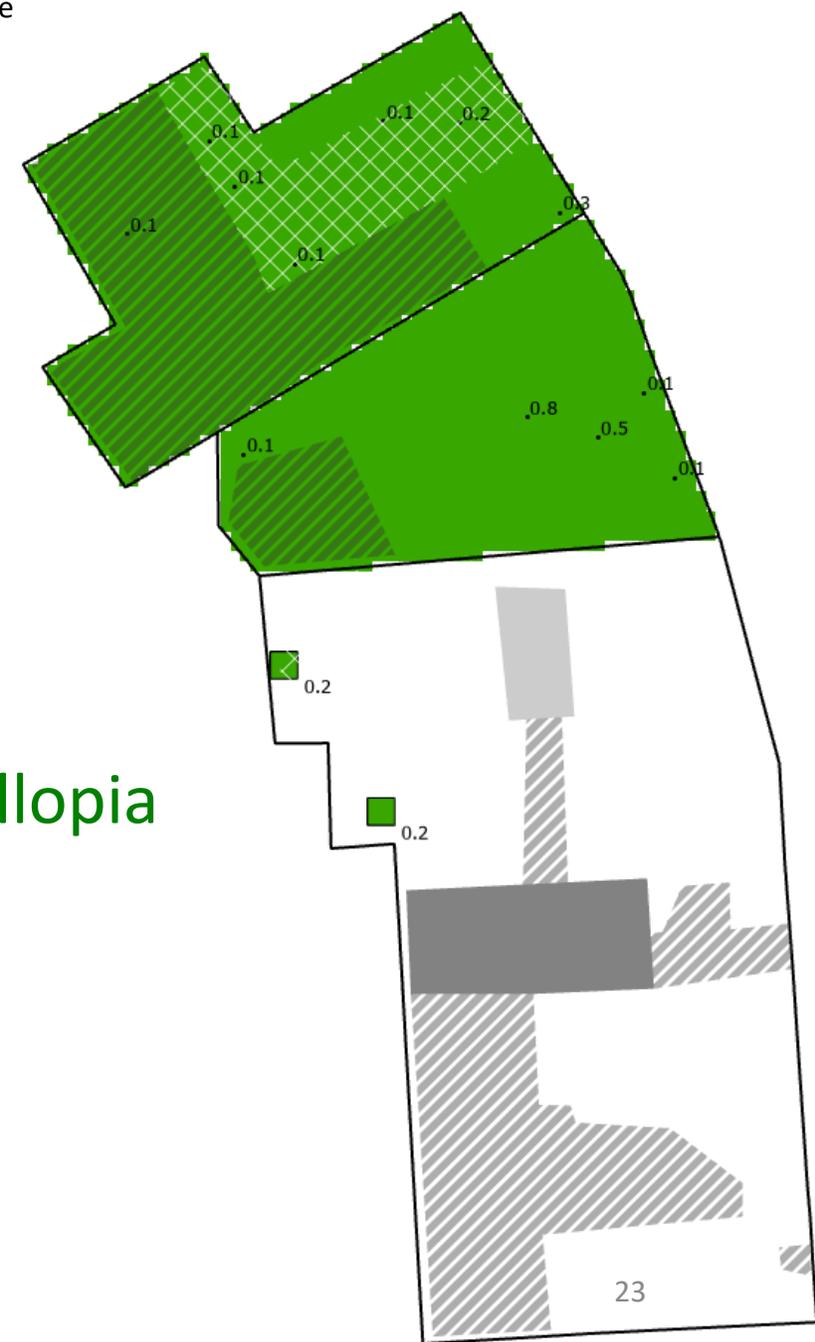
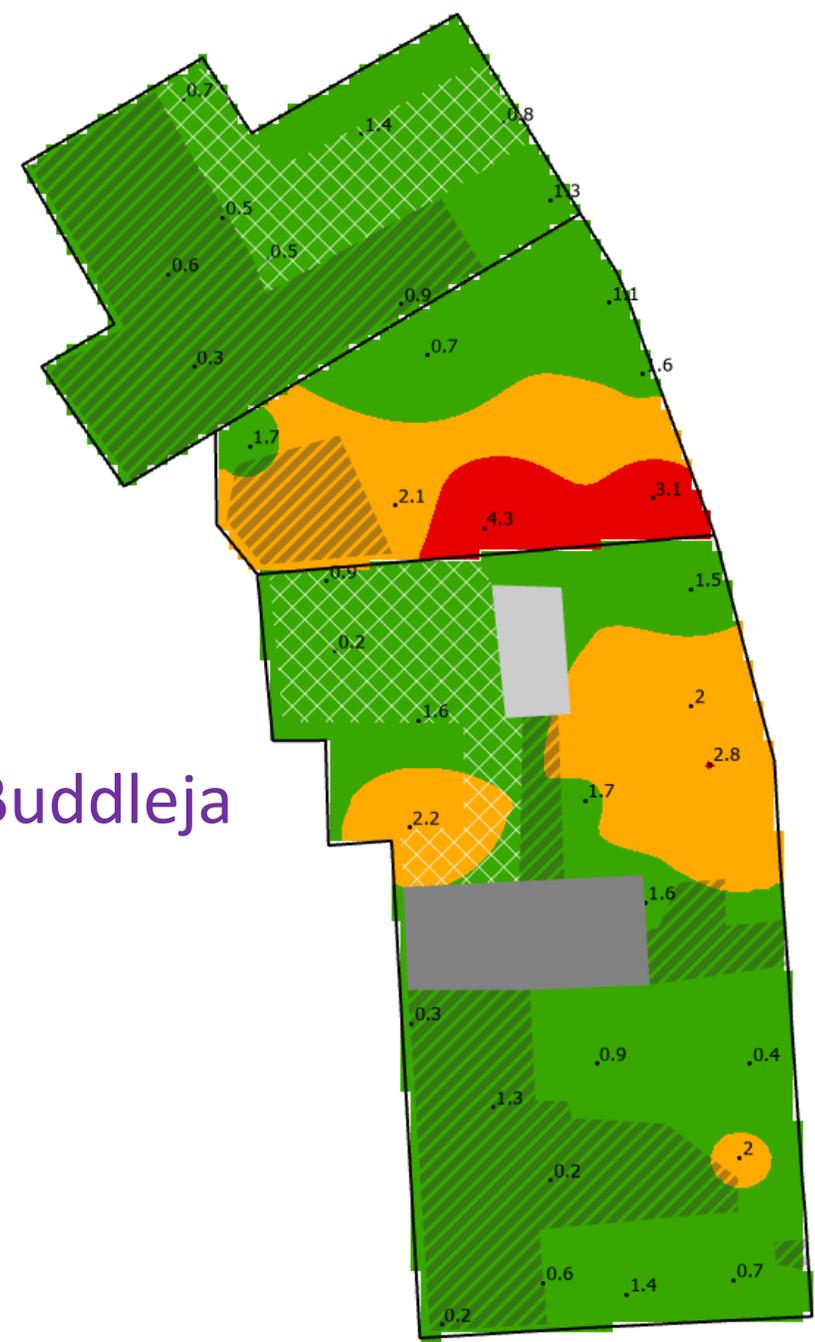
Phytodisponibilité
($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



Cartes des teneurs en Chrome (Cr)



1/550^e

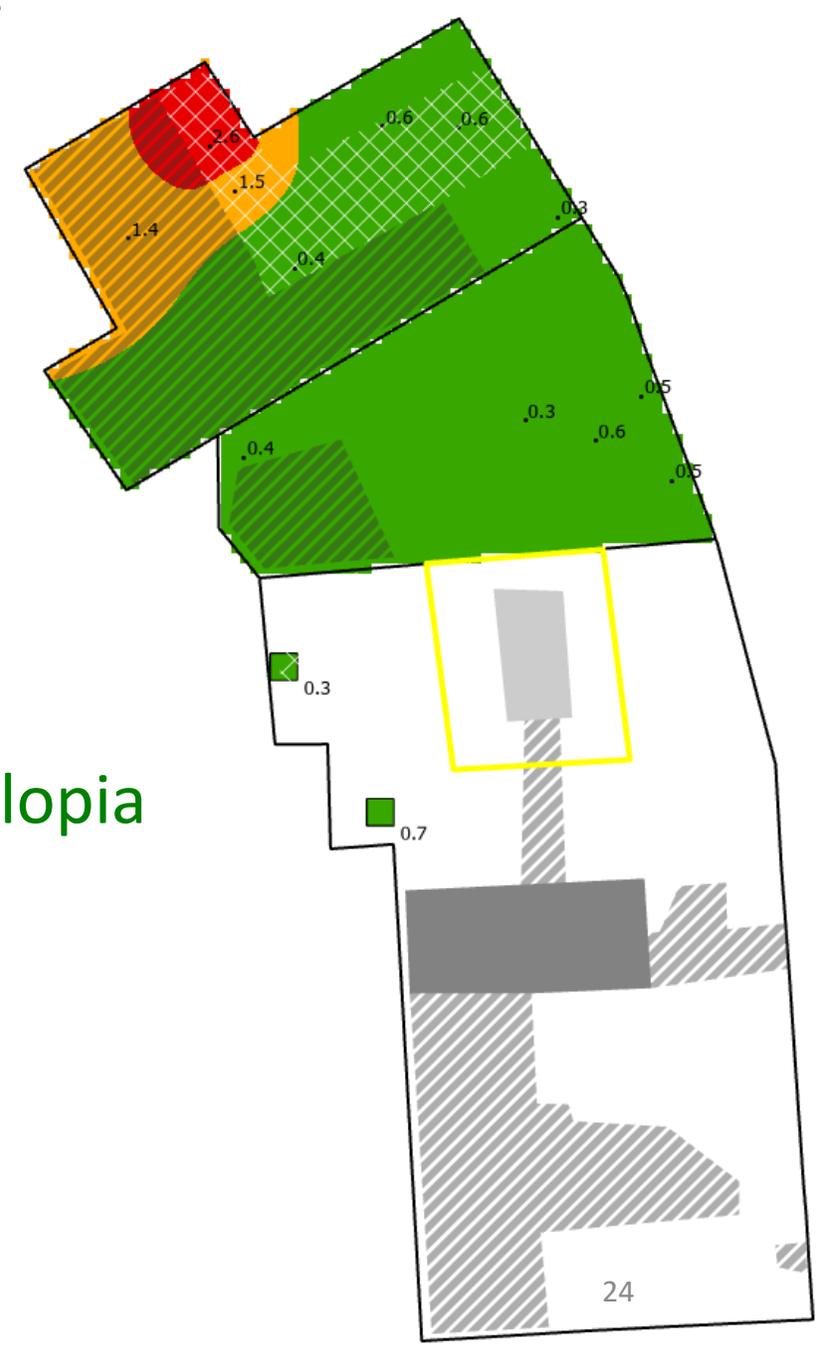
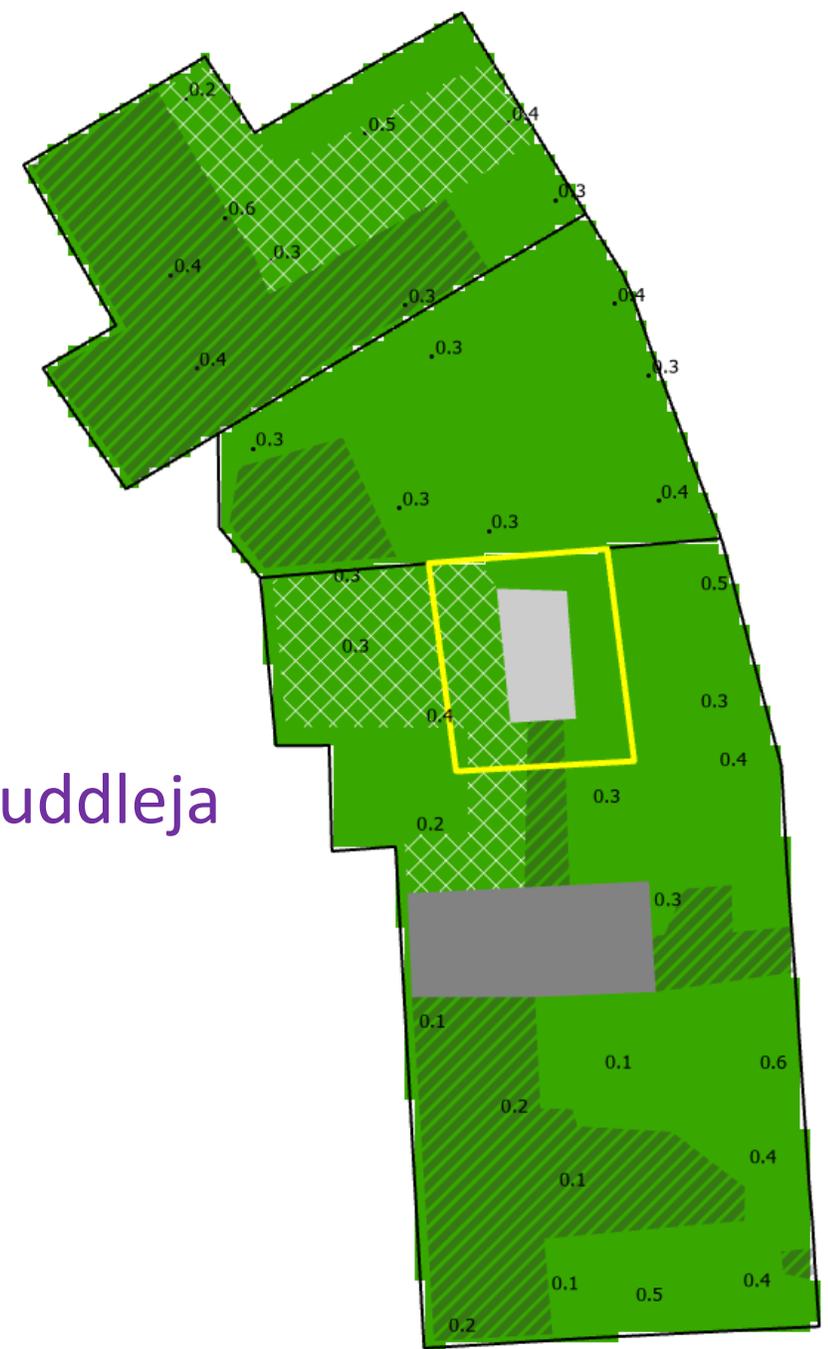
Phytodisponibilité
($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



Cartes des teneurs en Nickel (Ni)



1/550^e

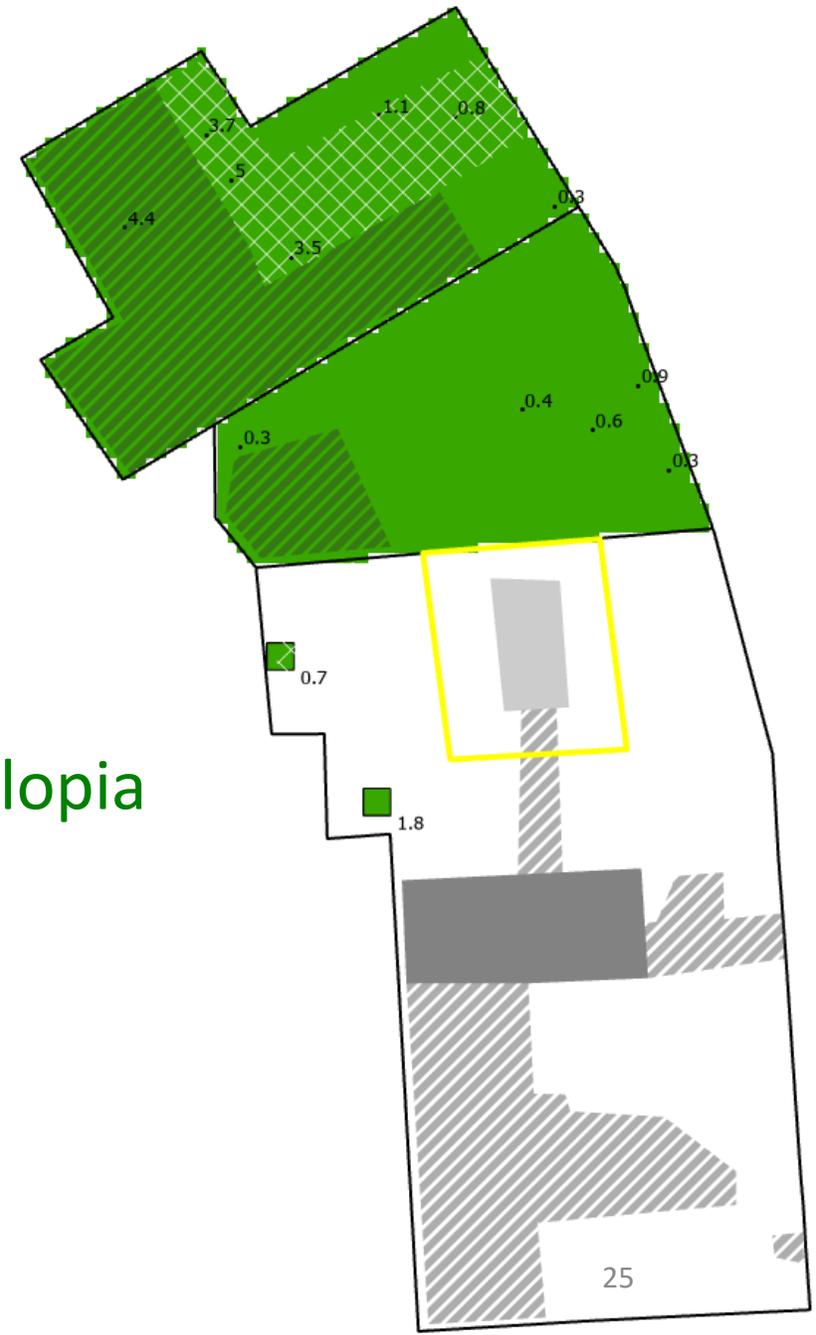
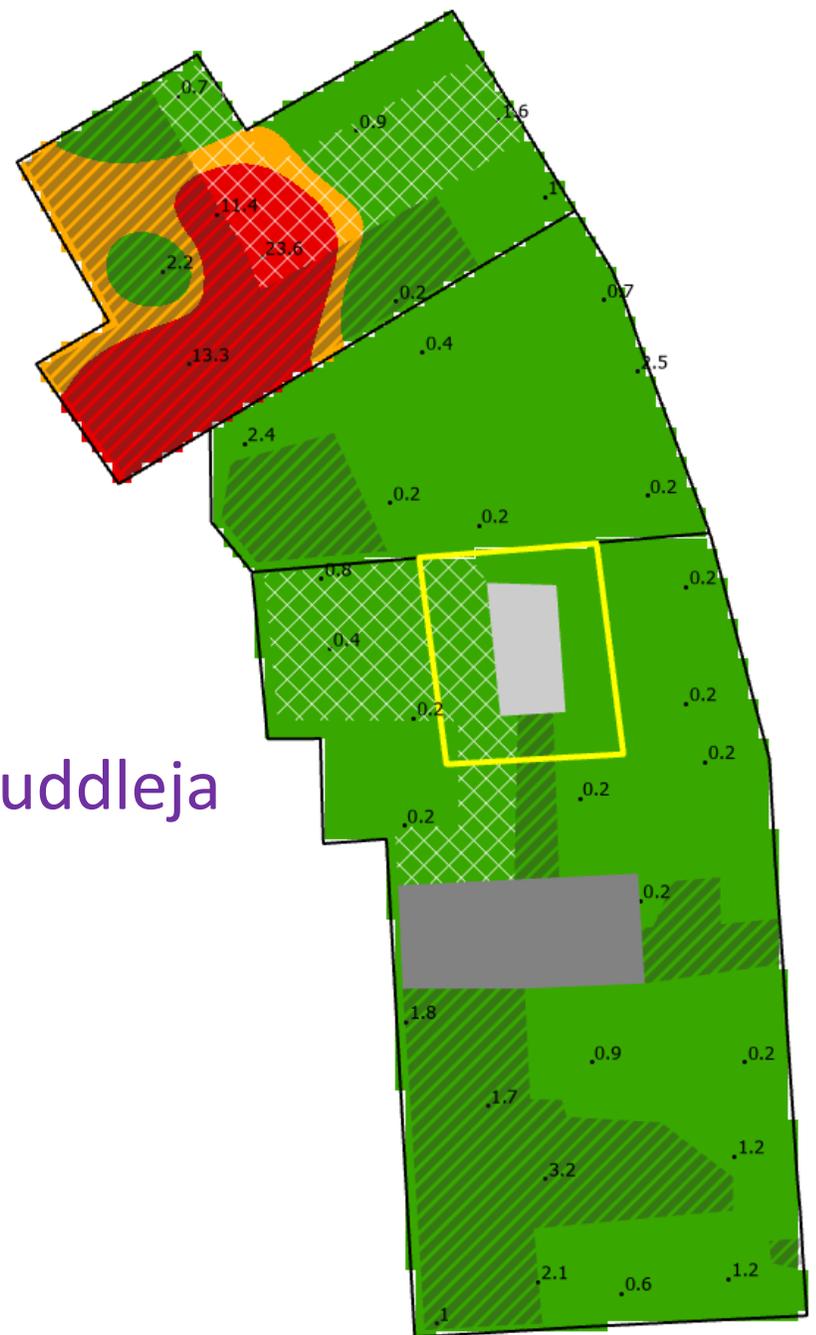
Phytodisponibilité
($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



Cartes des teneurs en Cuivre (Cu)



1/550^e

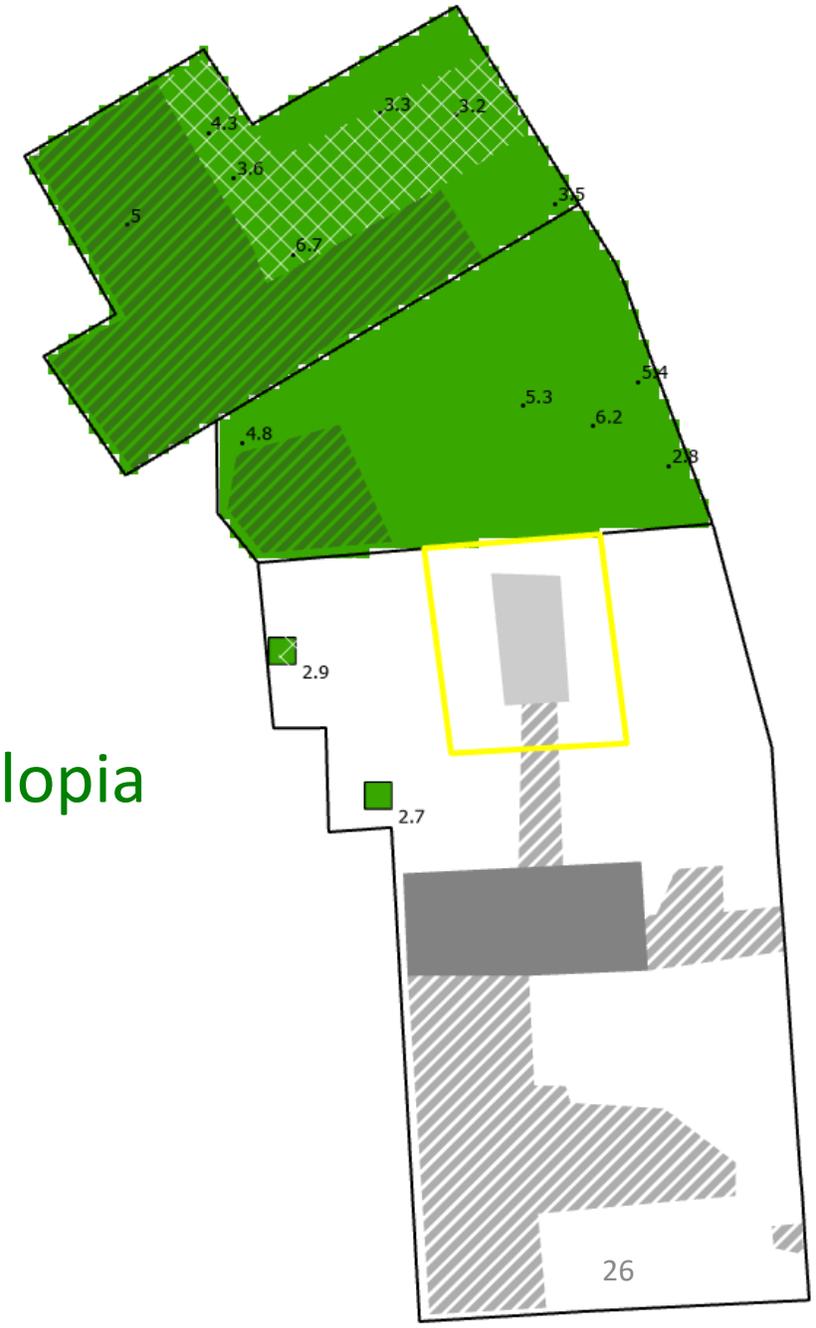
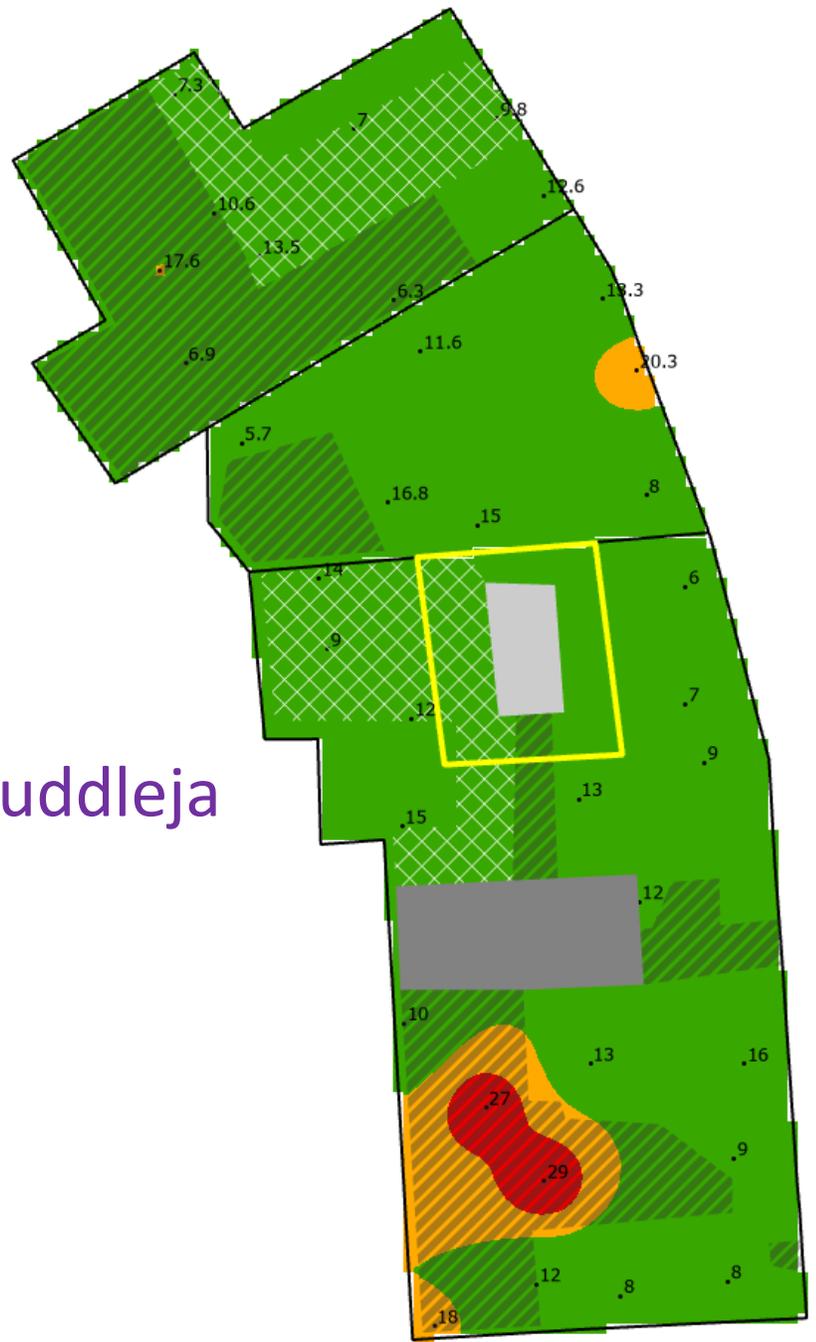
Phytodisponibilité
($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



Cartes des teneurs en Plomb (Pb)



1/550^e

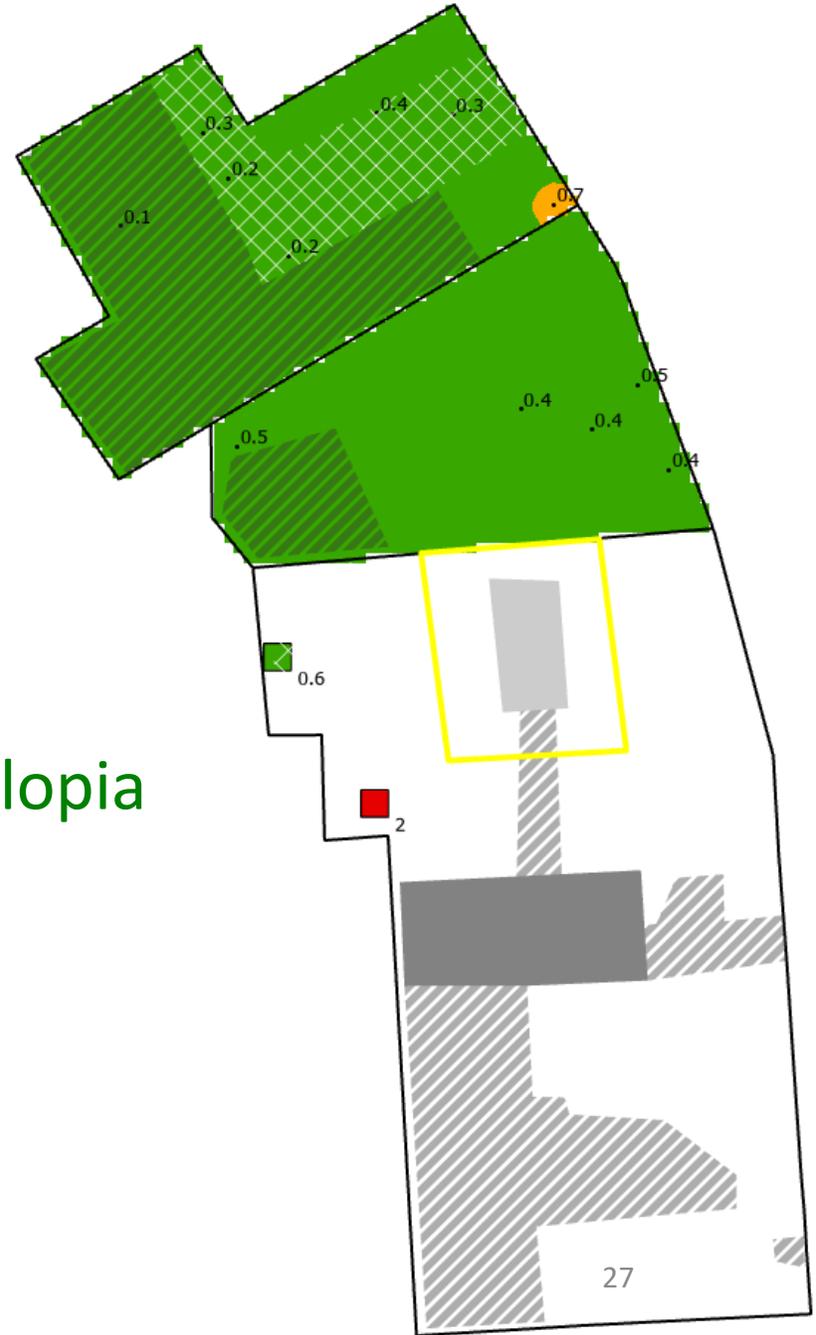
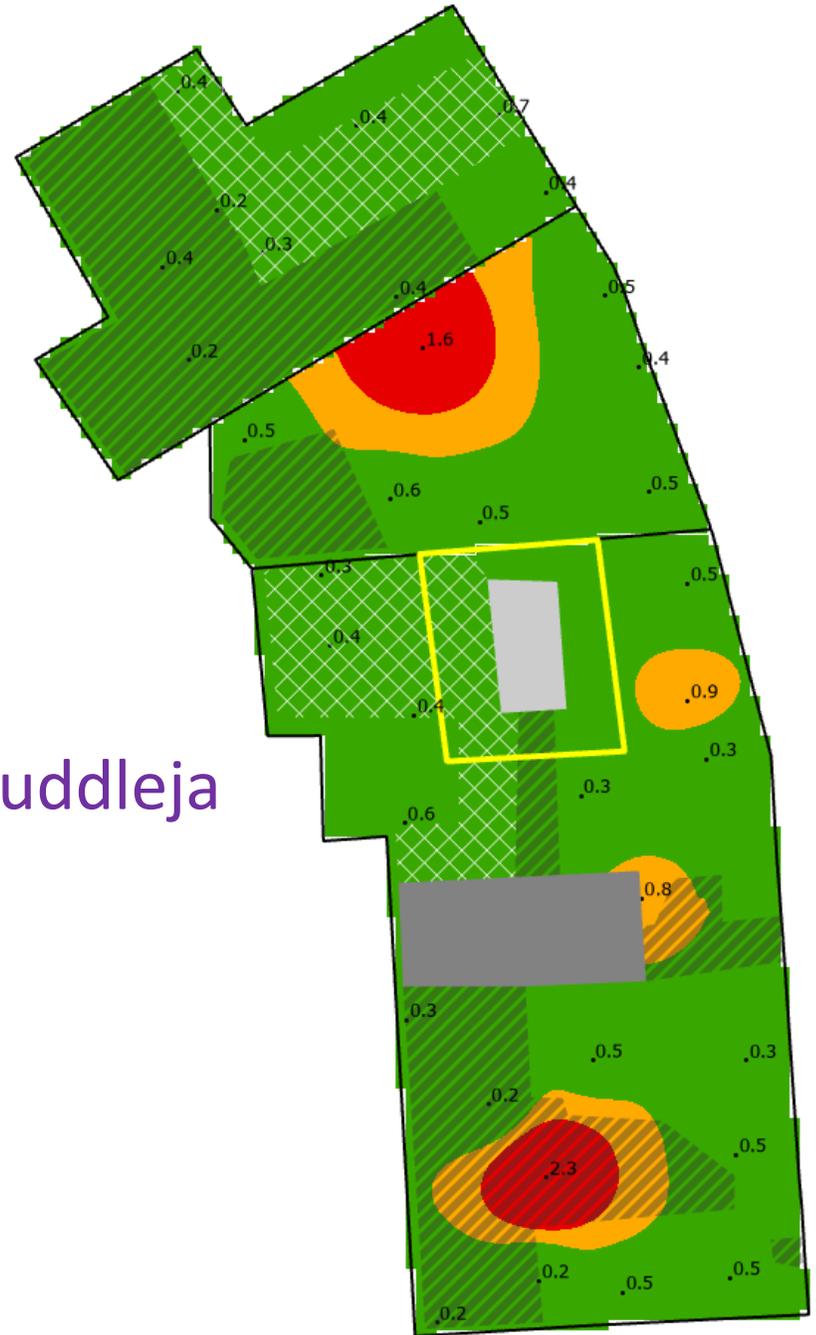
Phytodisponibilité
($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



27

Calcul d'un indice intégré d'excès de danger [Integrated Hazard Excess Index (IHE)]

Constantes de toxicité utilisées (METOX index)

$$\text{IHE} = \sum \left(\frac{C_m}{C_r} \right)_i \times k_i$$

$k_{\text{As}} : 10$

$k_{\text{Cd}} : 30$

$k_{\text{Cr}} : 2$

$k_{\text{Cu}} : 5$

$k_{\text{Hg}} : 40$

$k_{\text{Ni}} : 5$

$k_{\text{Pb}} : 5$

$k_{\text{Zn}} : 1$

Formule de calcul de l'indice (IHE)

i : élément chimique

k : constant de toxicité

C_m : teneurs mesurées

C_r : valeur seuil de référence

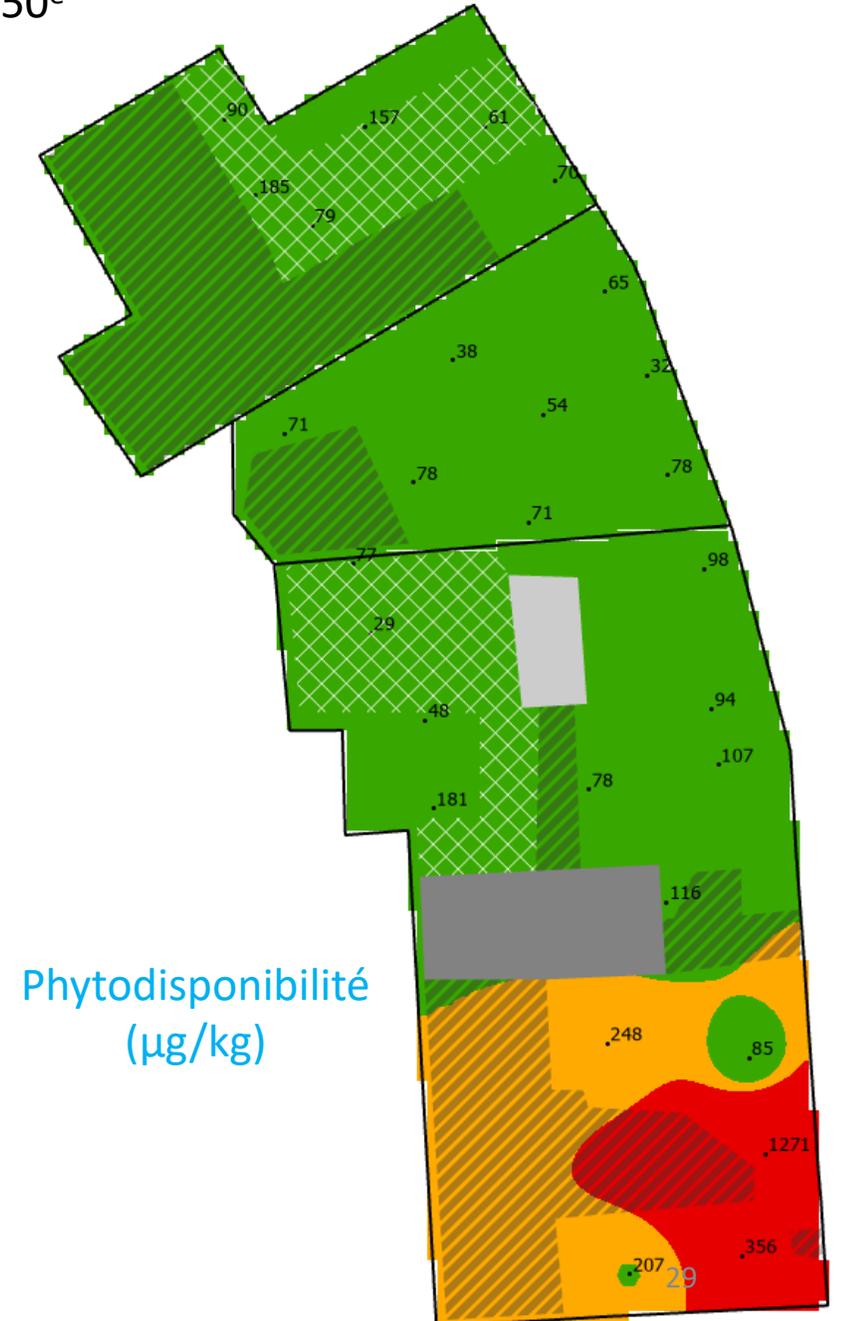
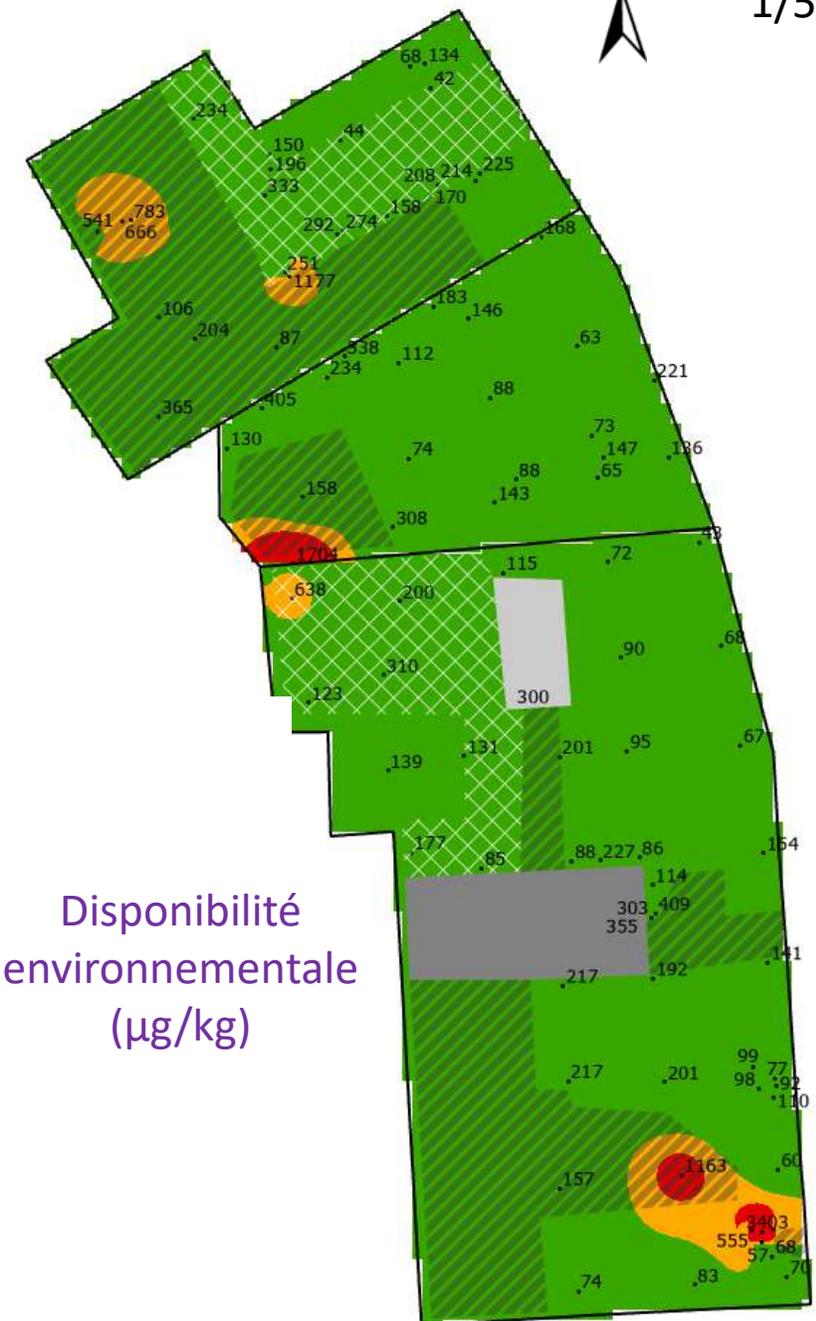
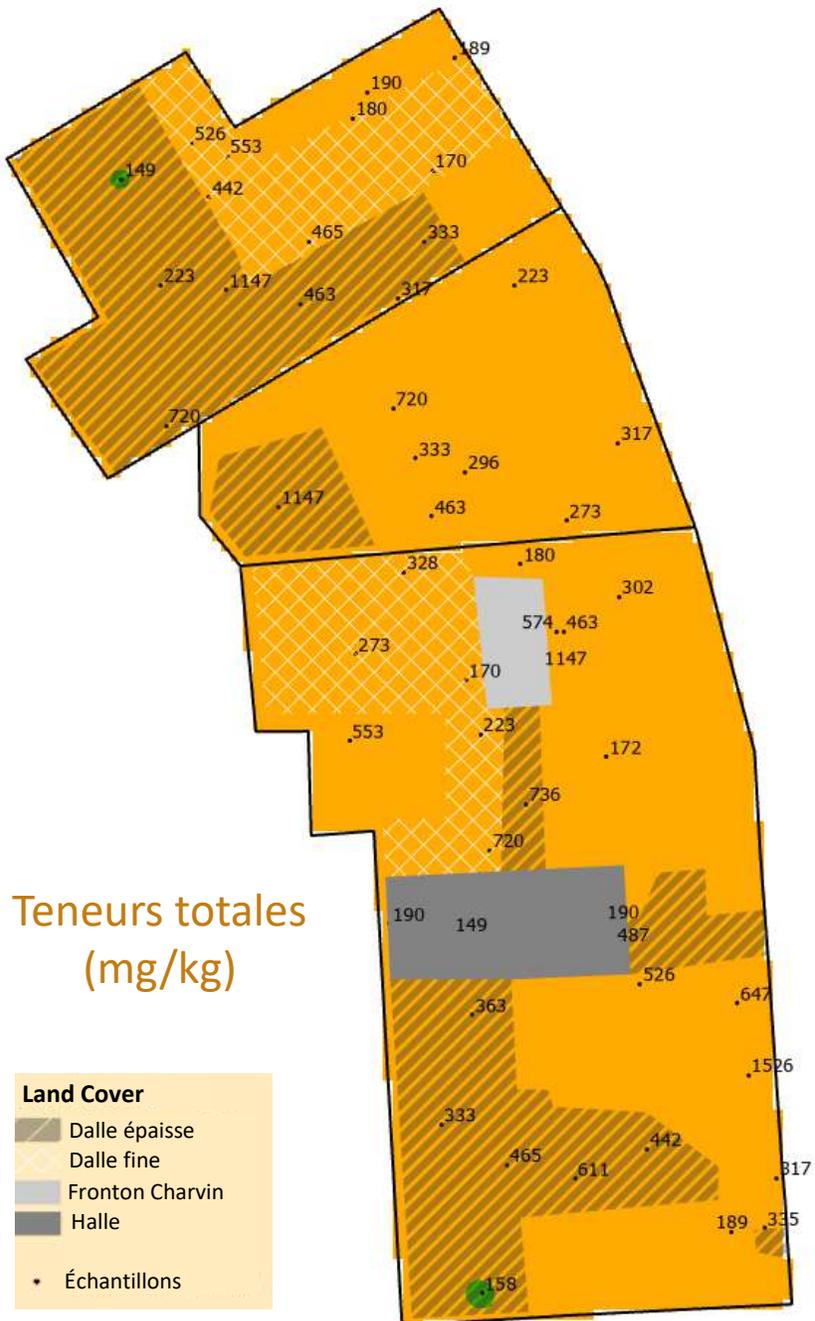
Métal	Gamme de valeur naturelles habituelles	Anomalies naturelles modérées	Anomalies naturelles fortes
Ni	2 à 60	60 à 130	130 à 2076

Exemple pour le nickel (Ni) en mg/kg

Cartes de l'indice intégré d'excès de danger (hors mercure)



1/550^e



Cartes de l'indice intégré d'excès de danger (hors mercure)



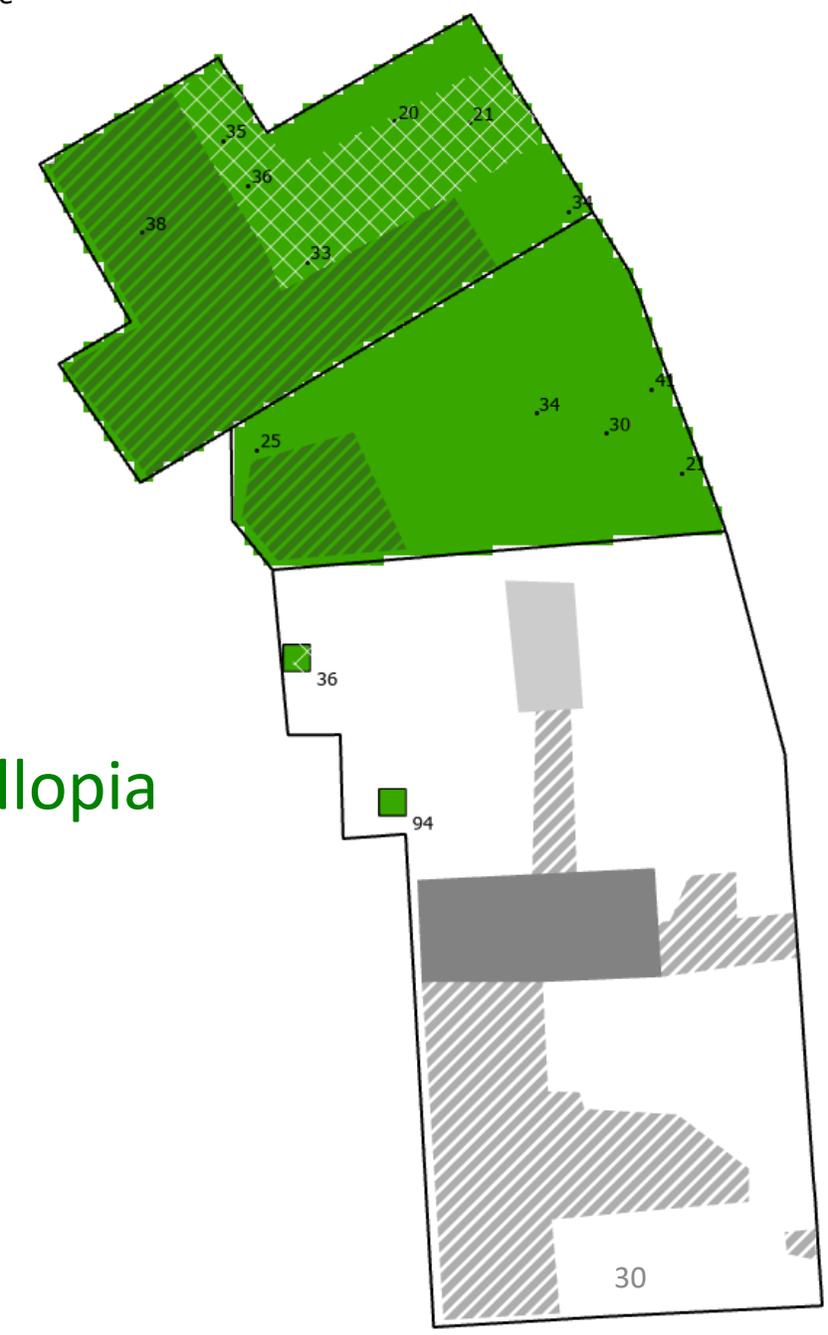
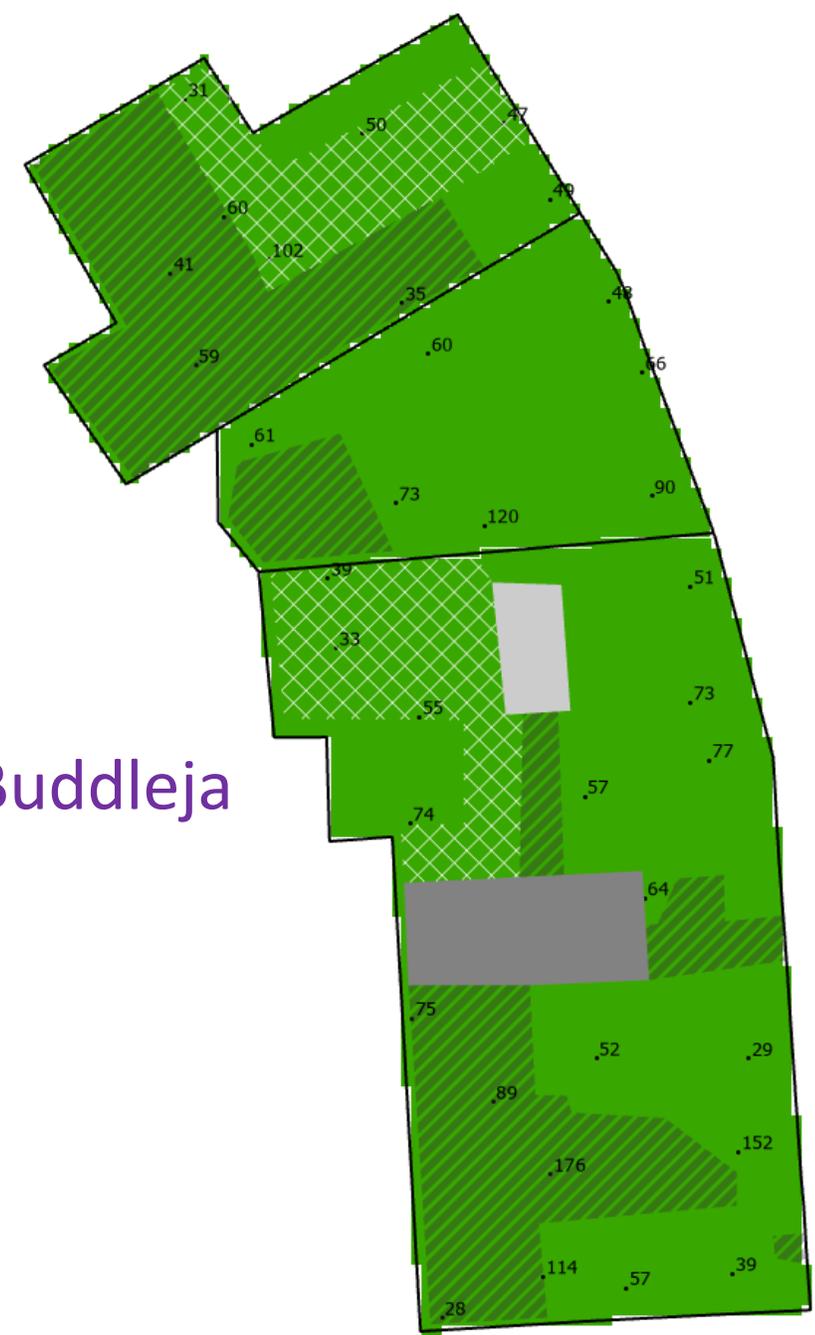
1/550^e

Buddleja

Fallopia

Land Cover

- Dalle épaisse
- Dalle fine
- Fronton Charvin
- Halle
- Échantillons



Au-delà des teneurs foliaires, que nous indiquent les communautés végétales sur le sol de la friche

Comment comprendre le langage des plantes ?

Inventaire botanique



**Recouvrement total
Nombre d'espèces**



*Caractéristiques autécologiques
des espèces présentes*

Types biologiques

**Aptitude du sol à la
croissance de végétaux**

Environnement physique
(Luminosité, température, humidité)
Caractéristiques du sol (pH, MO, ...)

Stade de la succession végétale
Contraintes du milieu
(stress, perturbation)

Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet de la toxicité du substrat : nombre d'espèces et recouvrement végétal

Au total sur le site : **145 espèces**

% d'homologies de composition entre les parcelles

	EK05	EK06	EK25
EK05	100	-	-
EK06	58	100	-
EK25	37	45	100

EK5 : $\approx 1370 \text{ m}^2$; 82 espèces ; 6 sp./100 m²
 \approx **78% recouvrement**

EK6 : $\approx 1100 \text{ m}^2$; 82 espèces ; 7,5sp./100 m²
 \approx **31% recouvrement**

EK25 : $\approx 3200 \text{ m}^2$; 107 espèces ; 3,3sp./100 m²
 \approx **44% recouvrement**



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet de la toxicité du substrat : nombre d'espèces et recouvrement végétal

---> Espèces dominantes = présence dans + de 50% des quadrats / **EK05**

Crepis vesicaria



Vulpia myuros



Melilotus albus



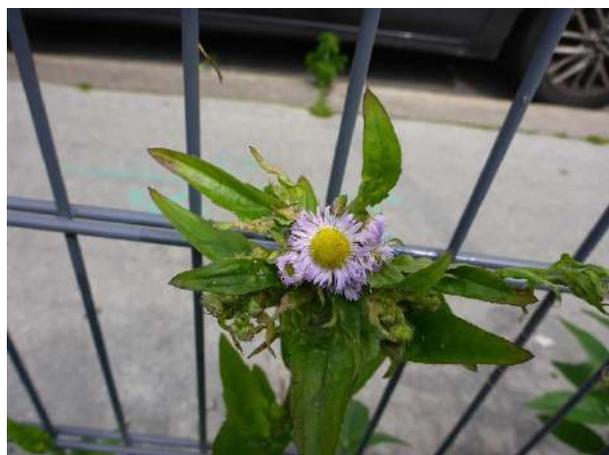
Lepidium virginicum



Medicago lupulina



Erigeron annuus



Daucus carota



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet de la toxicité du substrat : nombre d'espèces et recouvrement végétal

---> Espèces dominantes = présence dans + de 50% des quadrats / **EK06**



Vulpia myuros



Melilotus albus



*Matricaria
camomilla*



Picris hieracioides



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet de la toxicité du substrat : nombre d'espèces et recouvrement végétal

---> Espèces dominantes = présence dans + de 50% des quadrats / **EK25**



Artemisia annua



Picris hieracioides



Melilotus albus



Crepis vesicaria



Lactuca seriola



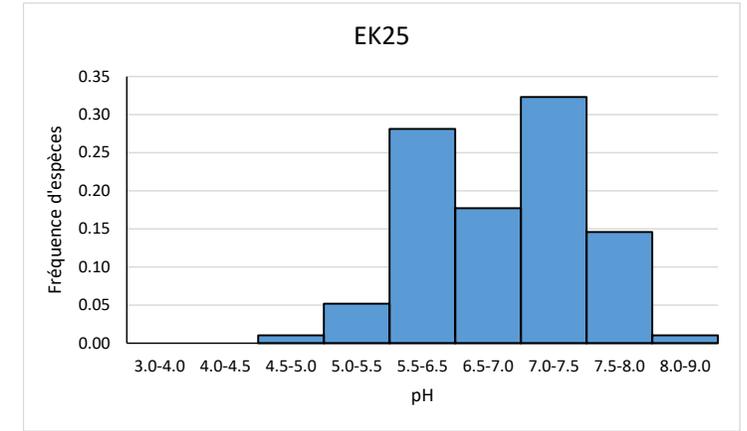
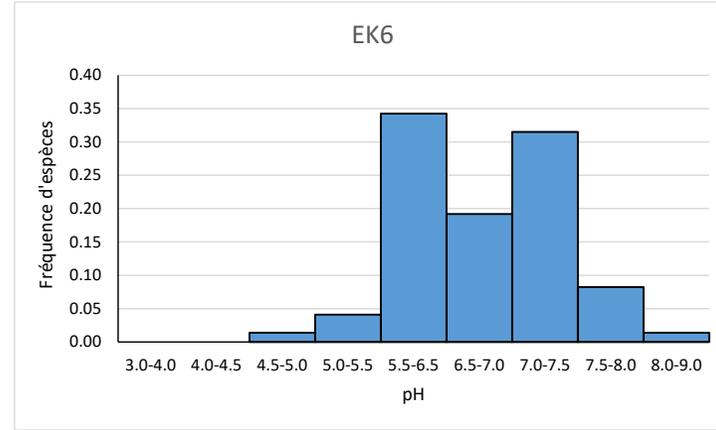
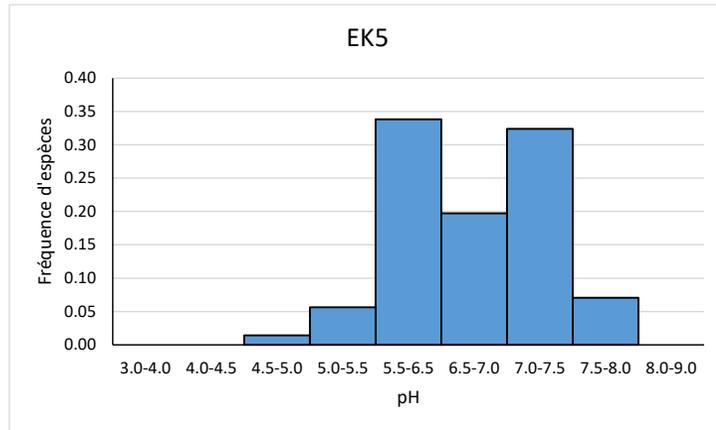
Erigeron canadensis



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet du milieu : valeurs indicatrices d'Ellenberg

pH du sol (1 à 9) : plantes neutroclines (5) , basoclines (6) et basophiles (7), voire perbasophiles (8)
 ---> sols plutôt neutres



(5) *Achilea millefolium*, *Cardamine hirsuta*, *Plantago lanceolata*, *Trifolium pratense*
 (7) *Saxifraga tridactyles*, *Senecio inequidens*, *Potentilla reptans*, *Lamium purpureum*



Senecio inequidens

Lamium purpureum



Cardamine hirsuta

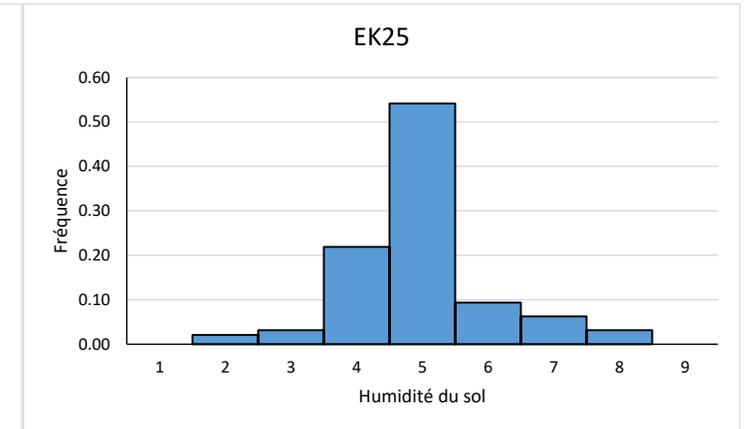
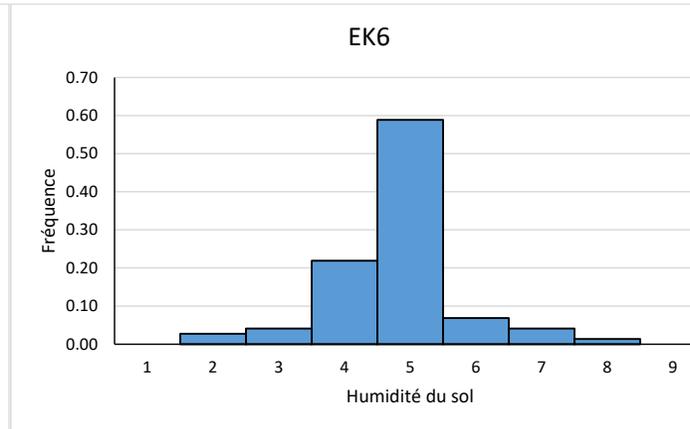
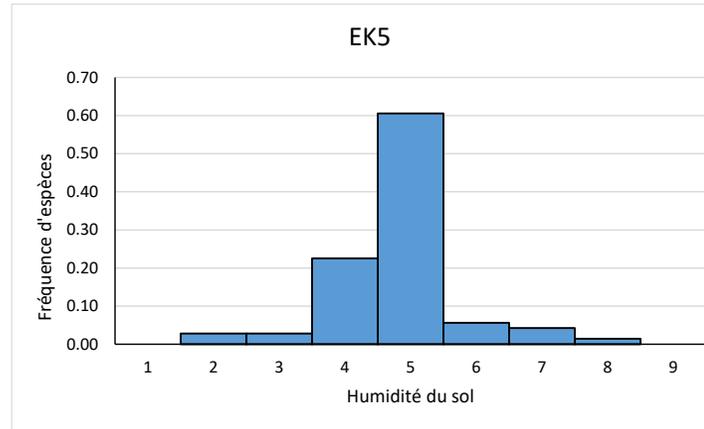
Plantago lanceolata

Saxifraga tridactyles

Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet du milieu : valeurs indicatrices d'Ellenberg

Humidité du sol (1 à 12) : plantes mesoxerophiles (4) et mesohydriques (5)
----> sols ni trop sec ni trop humide



(4) *Vulpia myuros*, *Silene latifolia*, *Reseda lutea*, *Medicago lupulina*

(5) *Achillea millefolium*, *Artemisia vulgaris*, *Lamium purpureum*, *Solanum nigrum*

Vulpia myuros



Silene latifolia



Reseda lutea



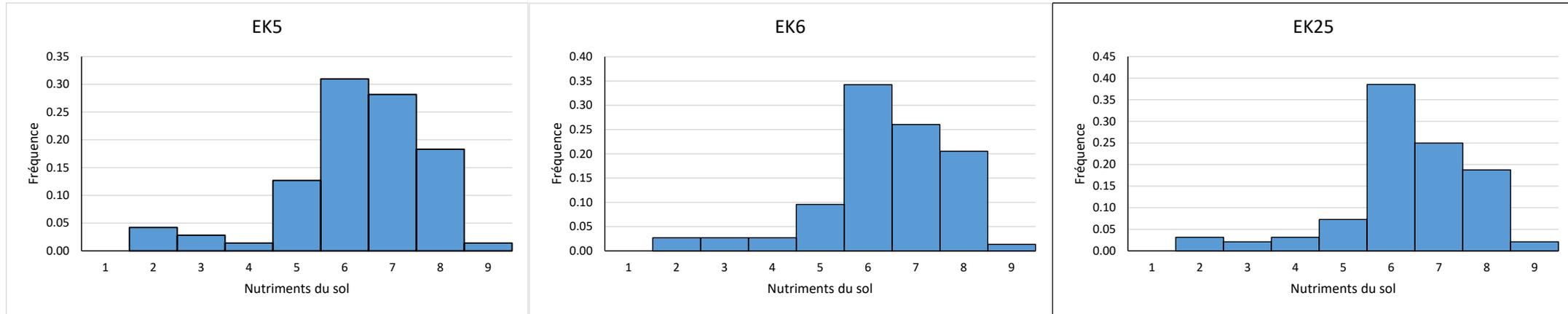
Lamium purpureum



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet du milieu : valeurs indicatrices d'Ellenberg

Nutriments du sol (1 à 9) : plantes mesotrophiles (5), **mesoeutrophiles (6)**, **eutrophiles (7)**, pereutrophiles (8)
---> sols plutôt riches en éléments nutritifs



(6) *Serastium glomeratum*, *Artemisia annua*, *Crepis vesicaria*, *Geranium molle*

(7) *Erigeron canadensis*, *Verbena officinalis*, *Sonchus asper*, *Geum urbanum*



Geranium molle



Verbena officinalis



Sonchus asper



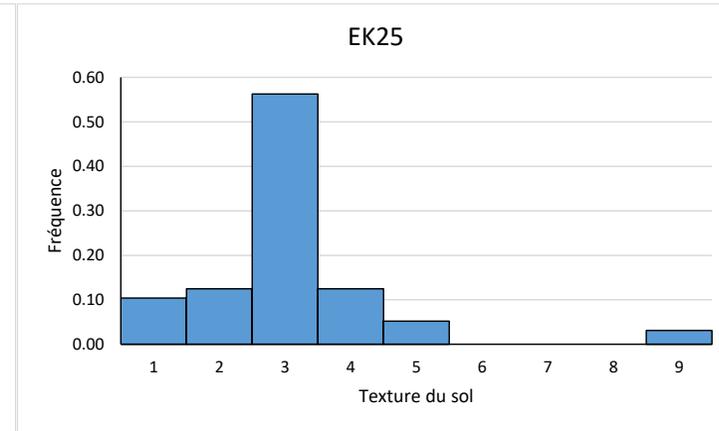
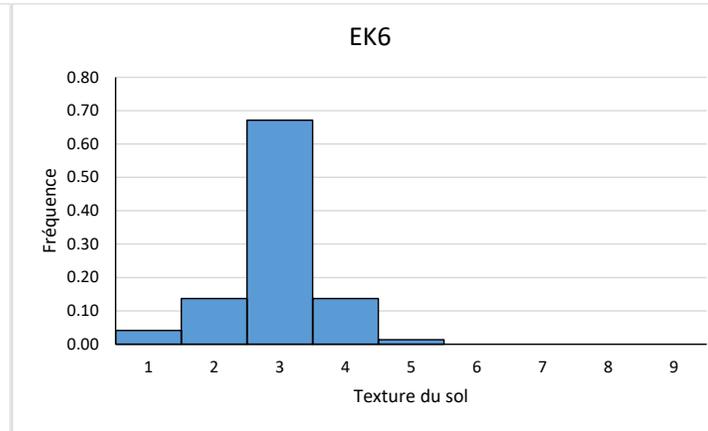
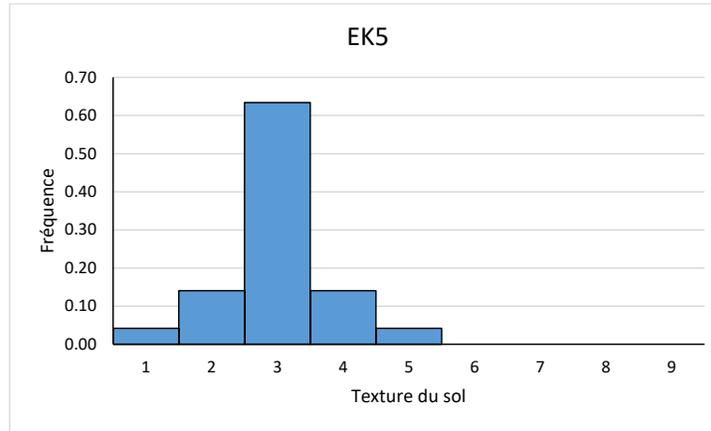
Geum urbanum



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet du milieu : valeurs indicatrices d'Ellenberg

Texture du sol (1 à 9) : argilo-limoneux (2), **limons (3)**, sable fin (4) et fissures verticales des parois (9)
----> sols plutôt fin



(3) *Verbena officinalis*, *Senecio vulgaris*, *Plantago lanceolata*, *Gallium aparine*
(9) *Parietaria judaica*, *Symbalaria muralis*, *Centrentus ruber*



Senecio vulgaris



Gallium aparine



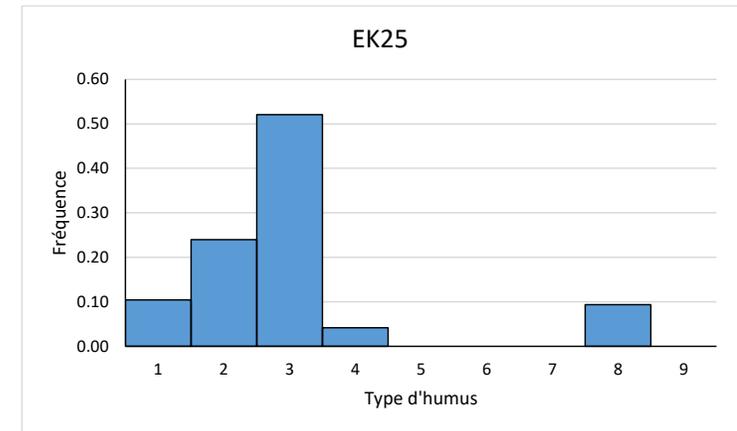
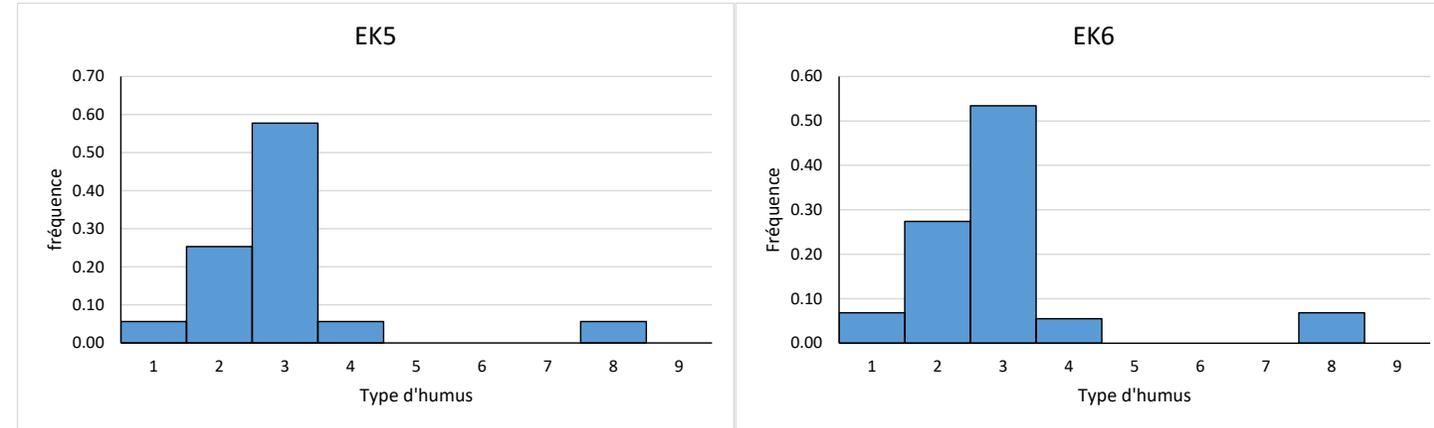
Centrentus ruber 39

Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet du milieu : valeurs indicatrices d'Ellenberg

Type d'humus (1 à 9) : mull carbonaté (2), **mull actif (3)** voire anmoor à gyttja (8)

----> sols actifs d'un point de vue biologique



(2) *Artemisia vulgaris*, *Cirsium vulgare*, *Daucus carotta*, *Geranium purpureum*

(3) *Cardamine hirsuta*, *Budleja davidii*, *Artemisia annua*, *Lactuca serriola*

(8) *Erigeron annuus*, *Populus nigra*, *Potentilla reptans*, *Solanum dulcamara*



Budleja davidii



Solanum dulcamara



Potentilla reptans



Cirsium vulgare

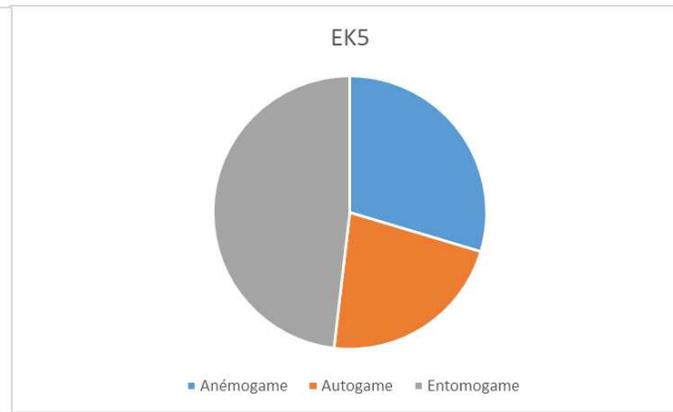
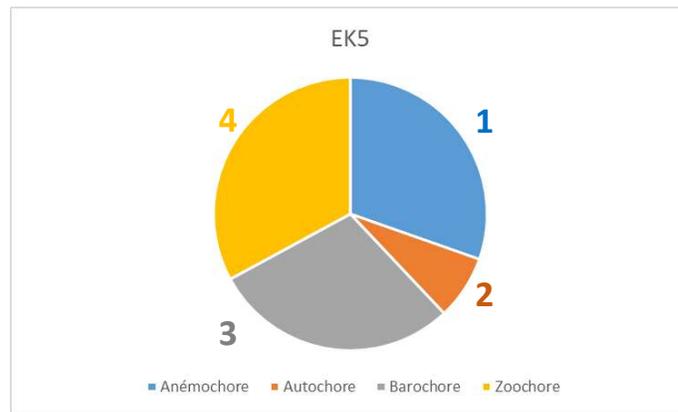


Geranium purpureum



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

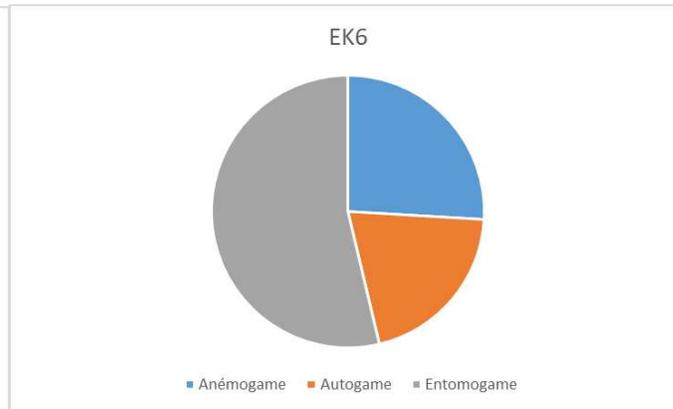
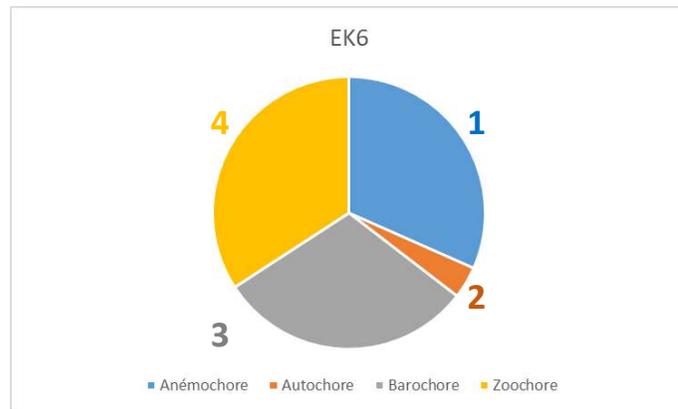
Au sujet de l'écologie de la communauté en place : types biologiques de Raunkier et modes de reproduction



Quelques insectes...



de la friche Neyron...



1. Anémochorie



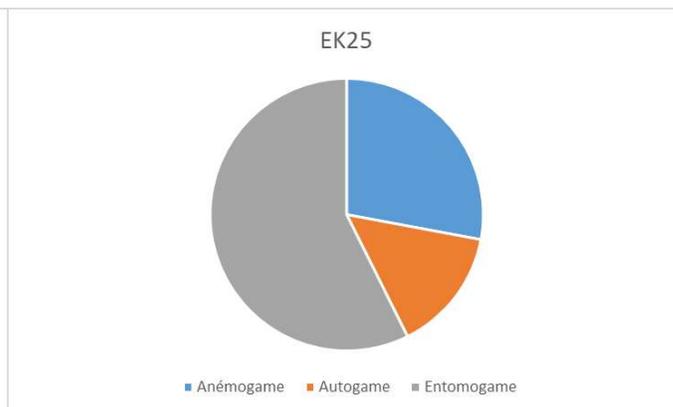
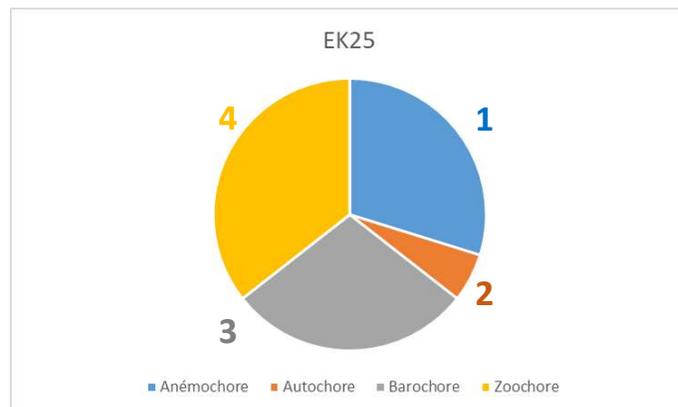
2. Autochorie



4. Zoochorie

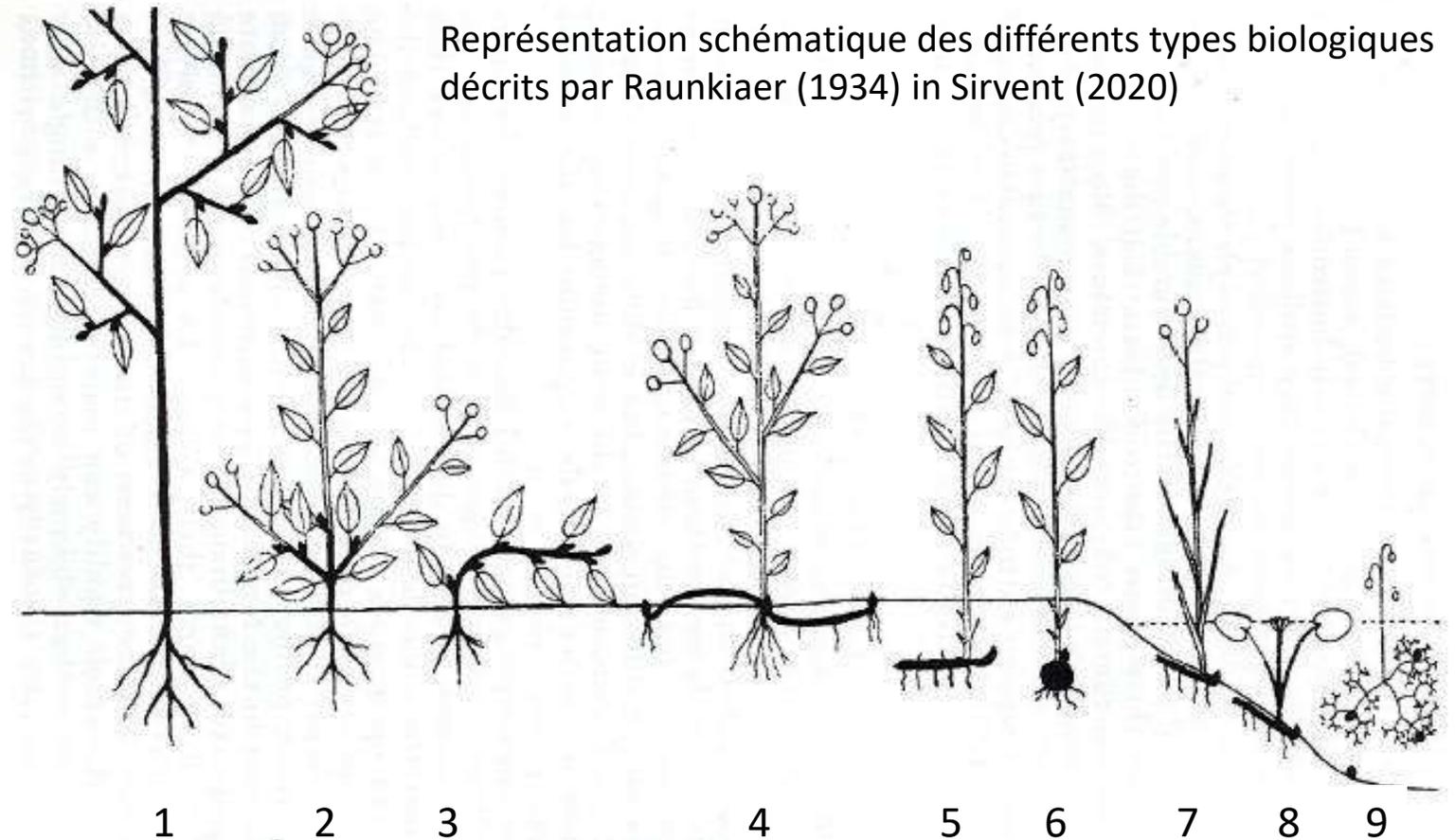
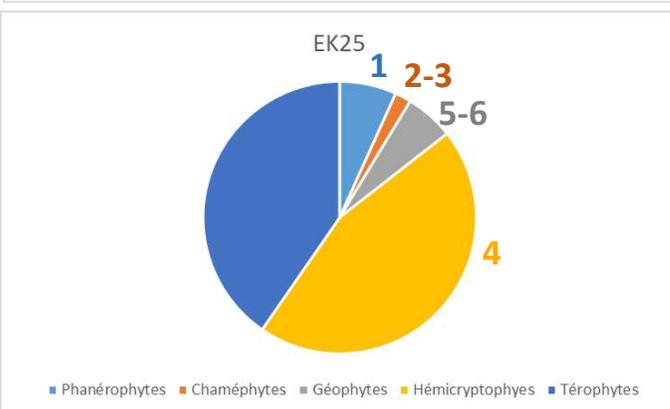
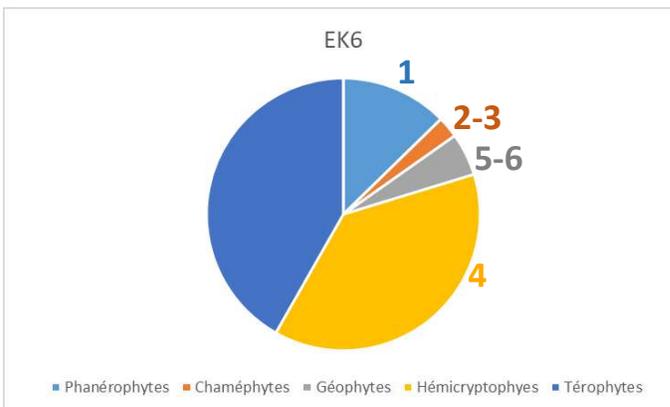
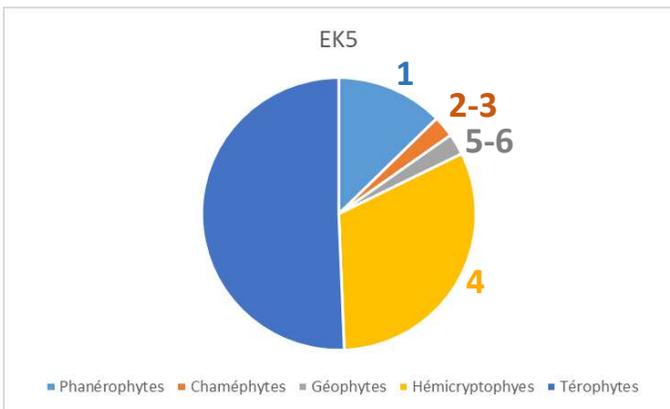


3. Barochorie



Ce que nous disent les plantes du site Neyron

Au sujet de l'écologie de la communauté en place : types biologiques de Raunkiaer (1934) et modes de reproduction



1 : phanérophytes

2-3 : chaméphytes

4 : hémicryptophytes

5-9 : cryptophytes dont 5-6 géophytes

7 : héliophytes

8-9 : hydrophytes.

- **thérophytes** (non représentés) – annuelles et biennuelles

En noir : axes persistants lors de la saison défavorable et qui portent les bourgeons de survie sont représentés

En gris : parties de la plante qui meurent durant la saison défavorable.

九 A ♀ غ 水 𐤀 Π 𐤁 ق*

* Le sol sur lequel je me développe présente un pH autour de la neutralité, sa texture est plutôt limoneuse (assez fine). Je n'ai pas à craindre de déficit en eau ni en éléments nutritifs. La vie du sol semble assez active et contribue efficacement au cycle de la matière organique.

Si les géochimistes vous disent que les métaux sont potentiellement mobiles, mes amis et moi ne les accumulons que très peu et en tout cas pas globalement pas plus que si nous avions poussé sur un sol naturel.



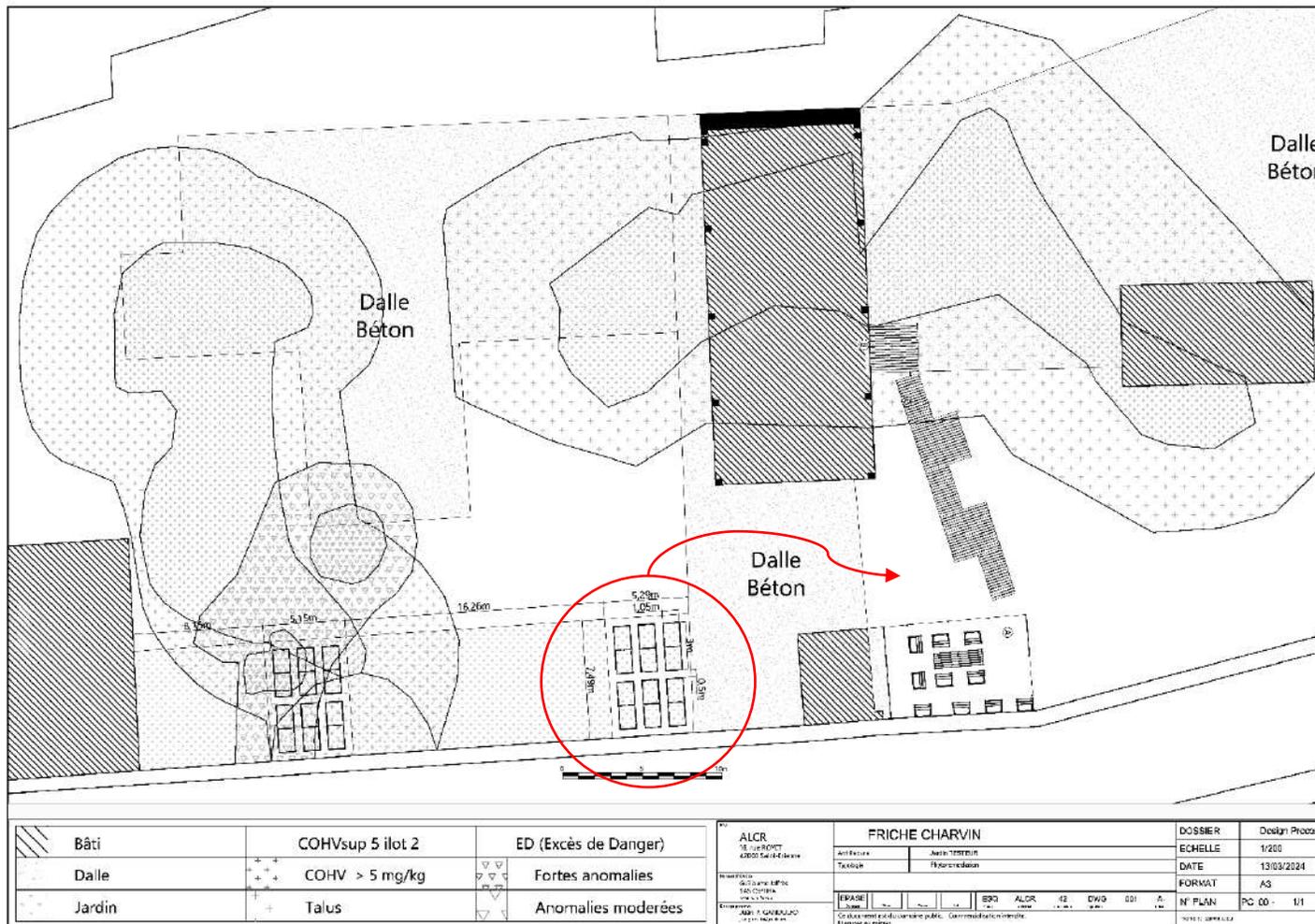
Tache 2 - cultures potagères en pleine terre : jardin testeur

Porteurs de la tâche : Amicale Laïc du Crêt de Roch

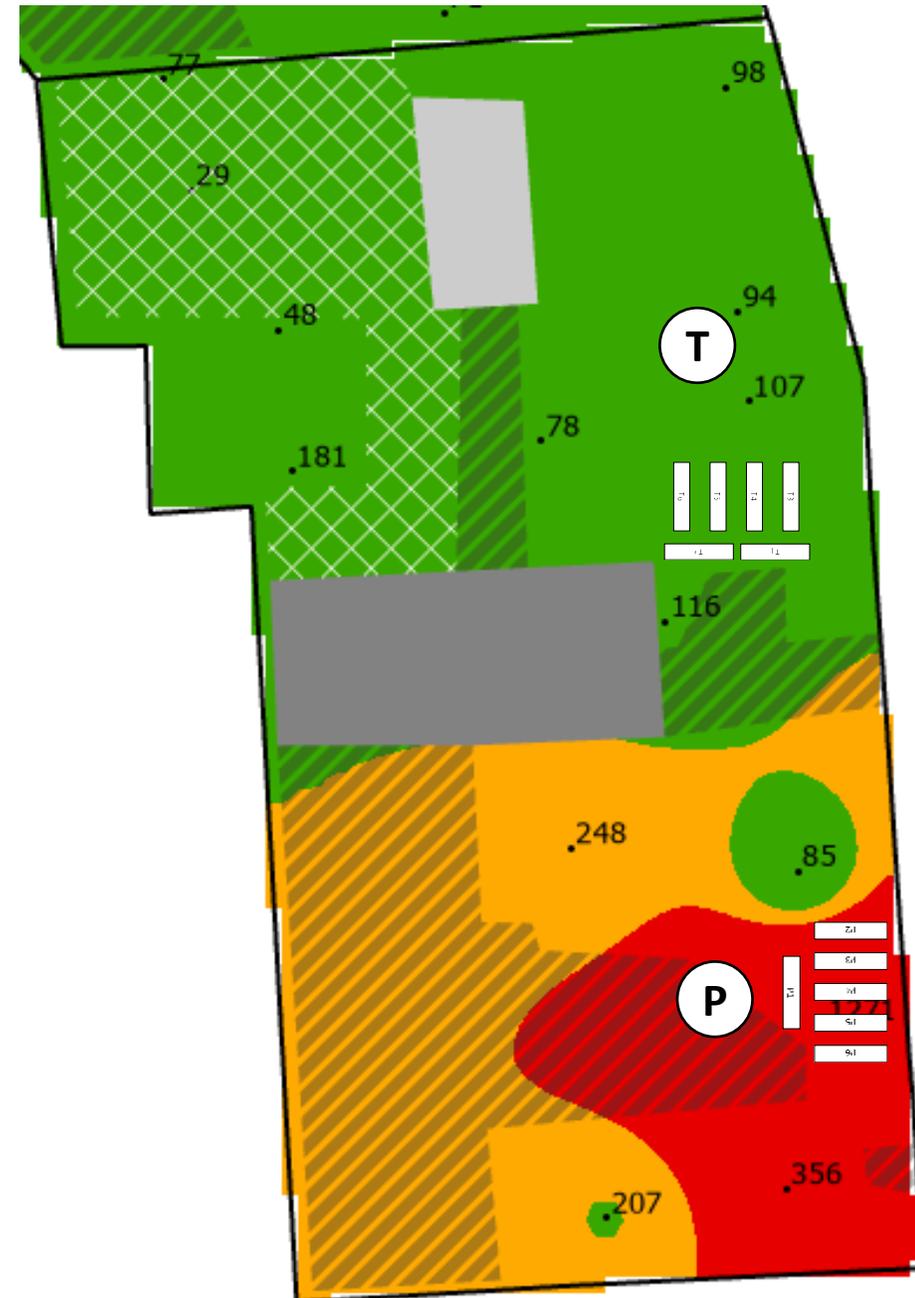
--> Guillaume Jaffres, Juan Pablo Gandulfo, Raymond Vasselon

Culture "Témoin" (T) : zone sans excès de danger de transfert pour les plantes

Culture "Test" (P) : zone avec excès de danger de transfert pour les plantes



Choix de la localisation des planches test



Tache 2 - cultures potagères en pleine terre : jardin testeur

Plan expérimental de culture et d'analyse

9 variétés de légumes par bac plantés à l'identique :

- > légumes fruits : tomate, courgette, haricot
- > légumes feuilles : laitue, poireau, blette
- > légumes racines/tubercules : radis, pomme de terre, carotte

Préparation des bacs :

- > travailler le sol comme pour un jardin (dépierrage, décompactage)
- > amendement organique Humiflor – Biomazor (NPK 2,1/1,5/2 + 1% MgO + 4% CaO) – 500g/m²
- > amendement minéral AB'FLOR (NPK 5/4/8 + 7% SO₃ + 3% MgO + 9% CaO) – 200g/m²

Récolte et analyses :

- > Sols des bacs (n = 12) - échantillon composite de 5 prélèvements (teneurs totales voire extractibles)
- > Légumes des bacs (n = 9 leg. x 12 bacs = 108) – parties comestibles (fruits, feuilles ou racines/tubercules)

- > Optionnel à titre de comparaison : légumes identiques (mêmes espèces et variétés) achetés dans le commerce (bio vs non-bio) et/ou cultivés dans les jardins du Crêt de Roch (n = 9 leg. x 6 répliques x 3 conditions = 162)



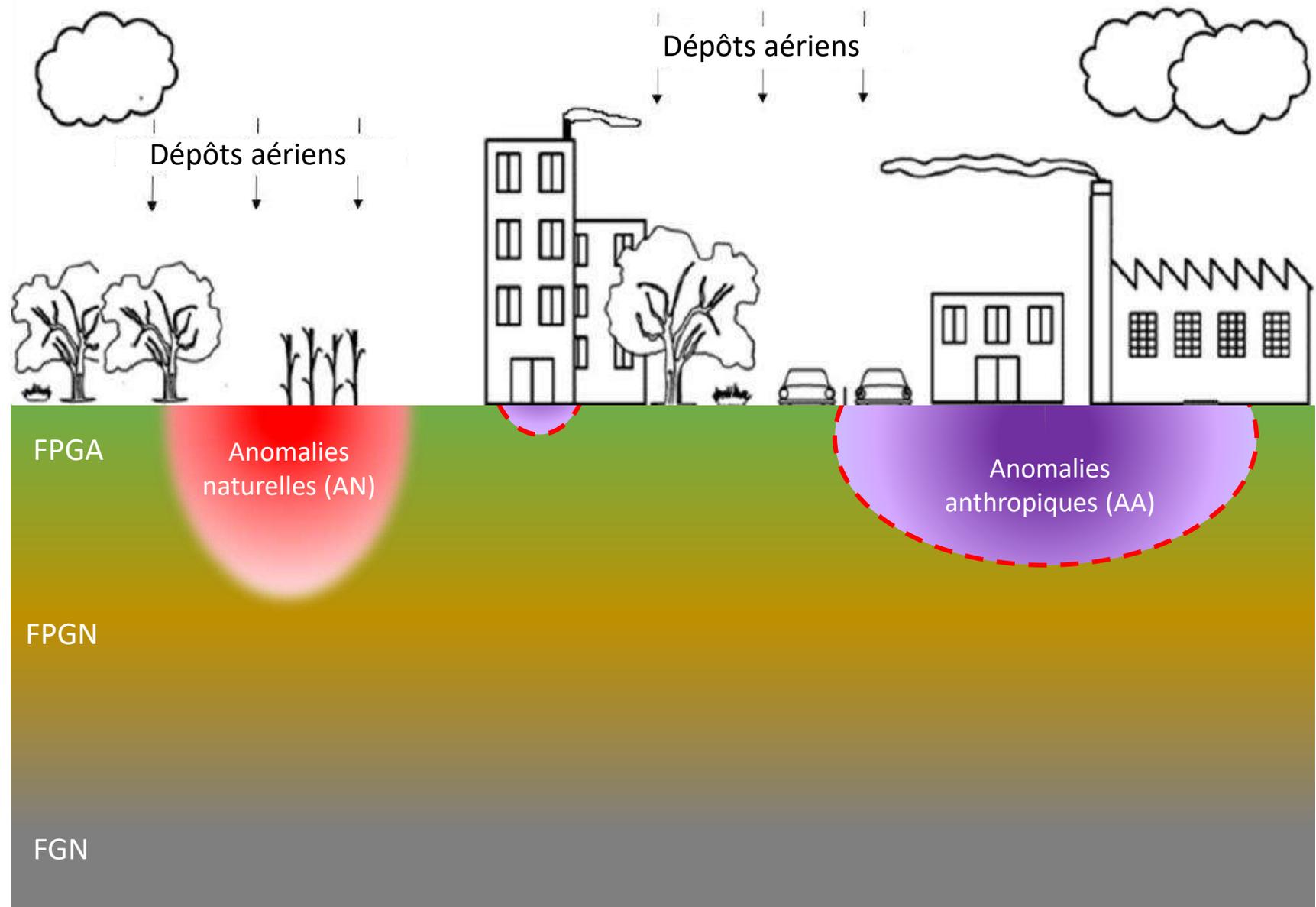
Pour aller plus loin : thèse de Rachel Seillier

fig. 25 Paléogéographie de la région de Saint-Étienne au Carbonifère



G. Vitel (2001) – *Géologie de la Loire*

Notion d'anomalies anthropiques



Fond géochimique

Fond géochimique local

Parcs urbains

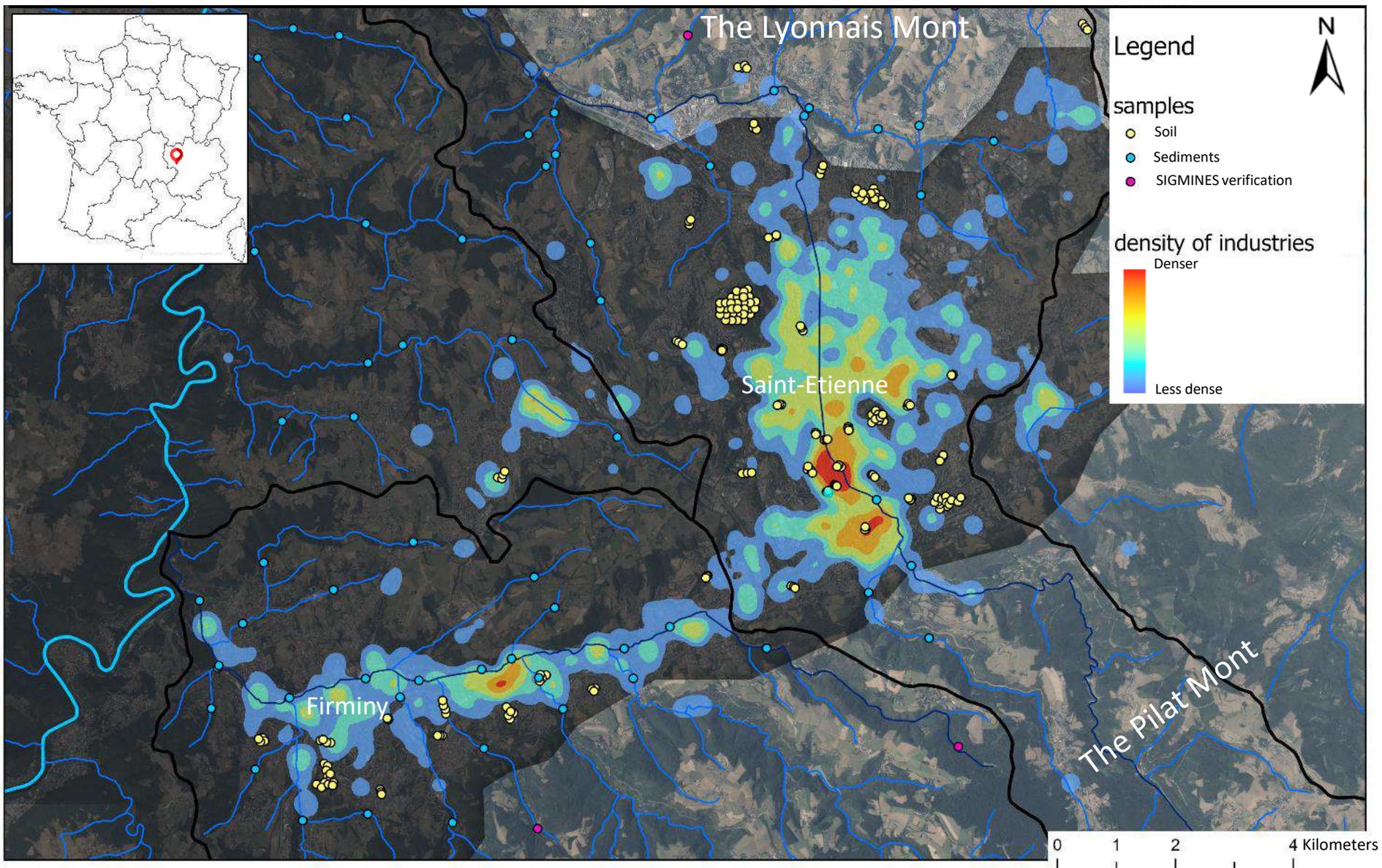
Sédiments

Teneurs totales

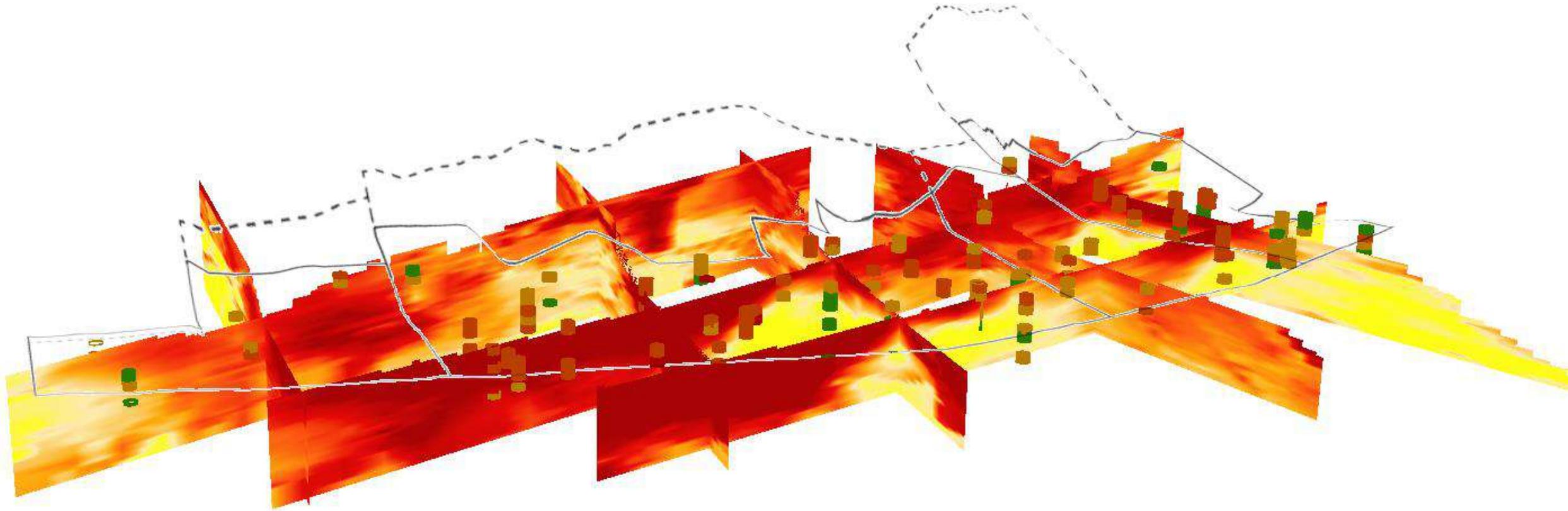
Biodisponibilité
environnementale



Saint-Etienne – territoire industriel



A suivre...





Une école de l'IMT

Loire
LE DÉPARTEMENT

 **La Région**
Auvergne-Rhône-Alpes

 **RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**

 **BANQUE des TERRITOIRES** 

-EPA-SAINT-ÉTIENNE-

SÉM

Saint-Étienne
Ville créative design

SAINT-ÉTIENNE
la métropole

*Liberté
Égalité
Fraternité*
 **MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE LA SOUVERAINETÉ INDUSTRIELLE ET NUMÉRIQUE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

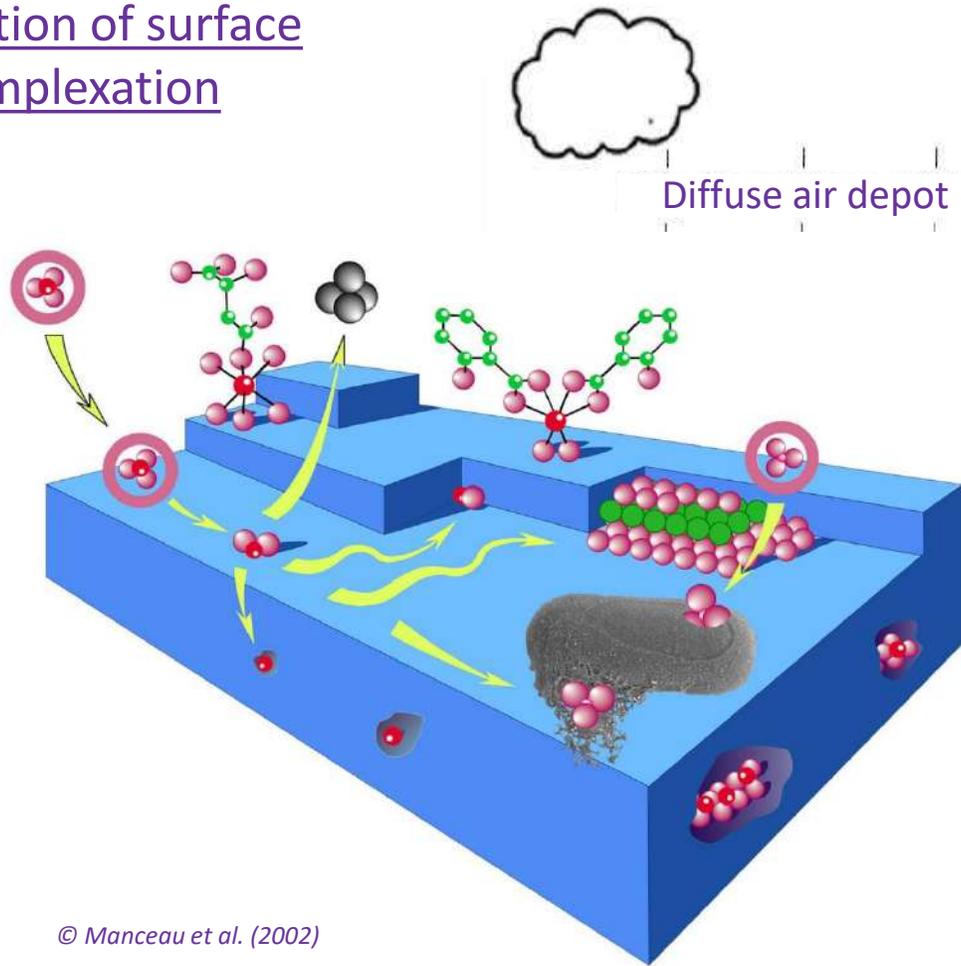
FRANCE 2030

 **Institut Mines-Télécom**

Merci pour votre attention

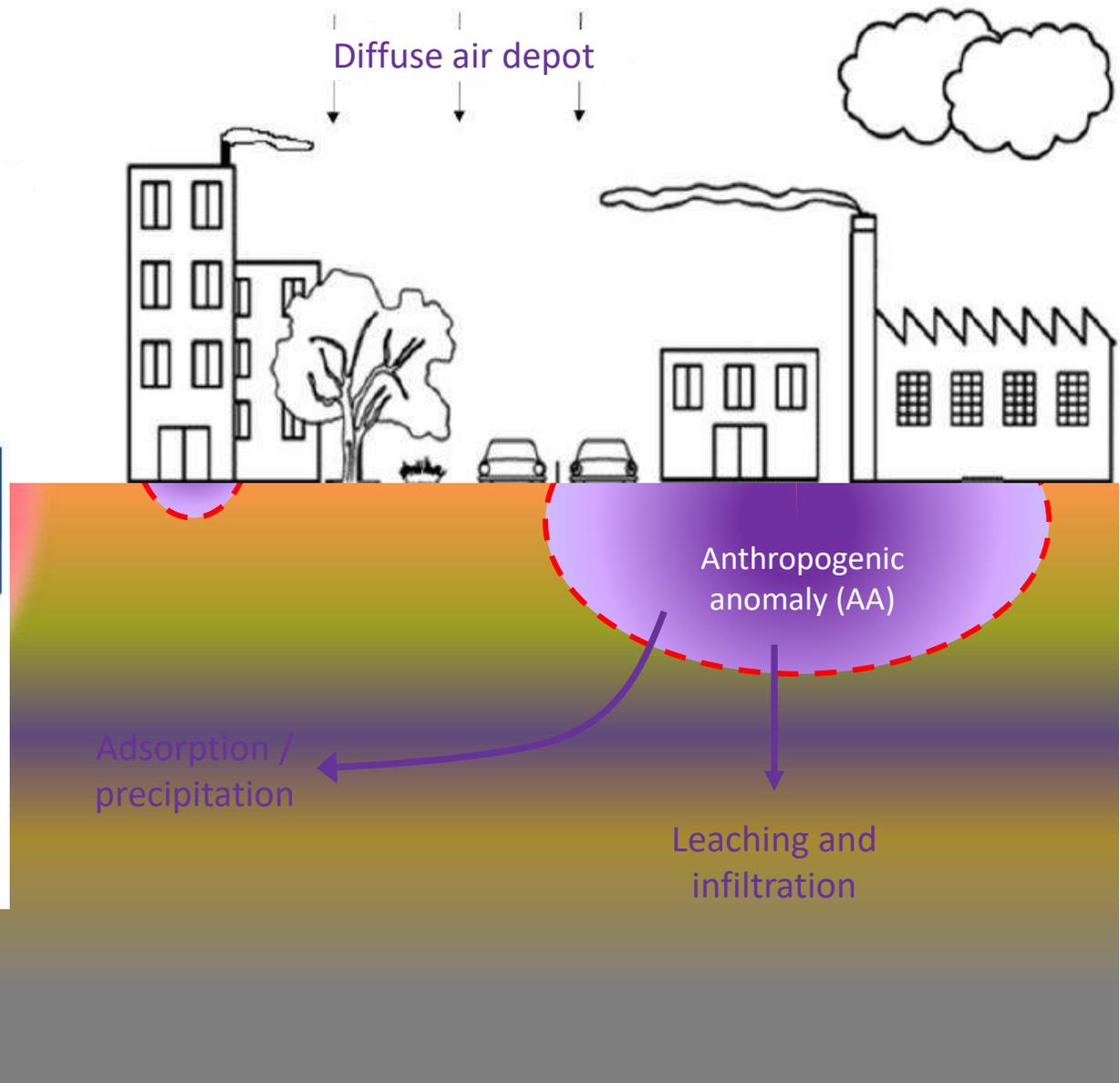
 **INSPIRING INNOVATION**
SINCE 1816

Notion of surface complexation

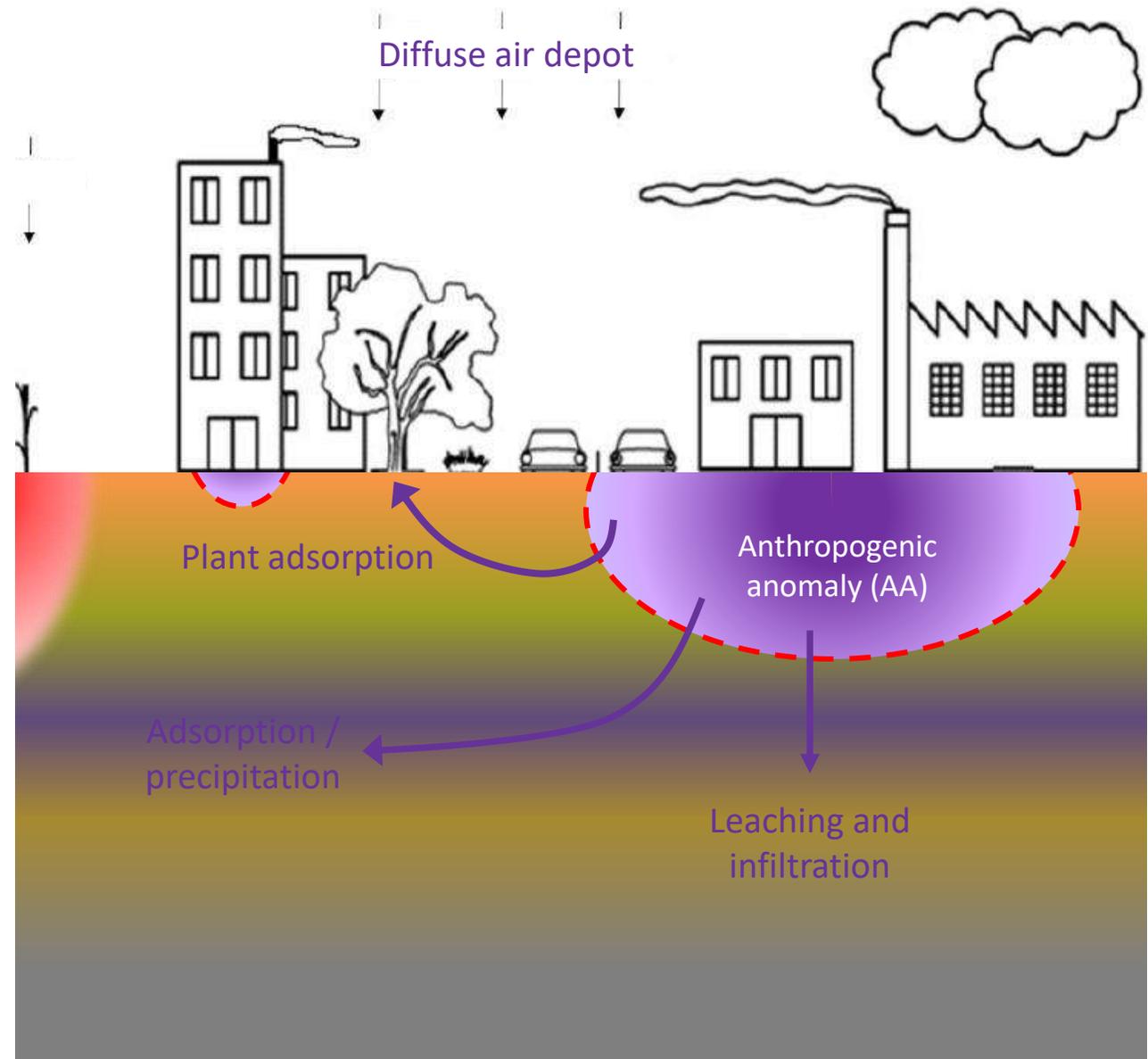
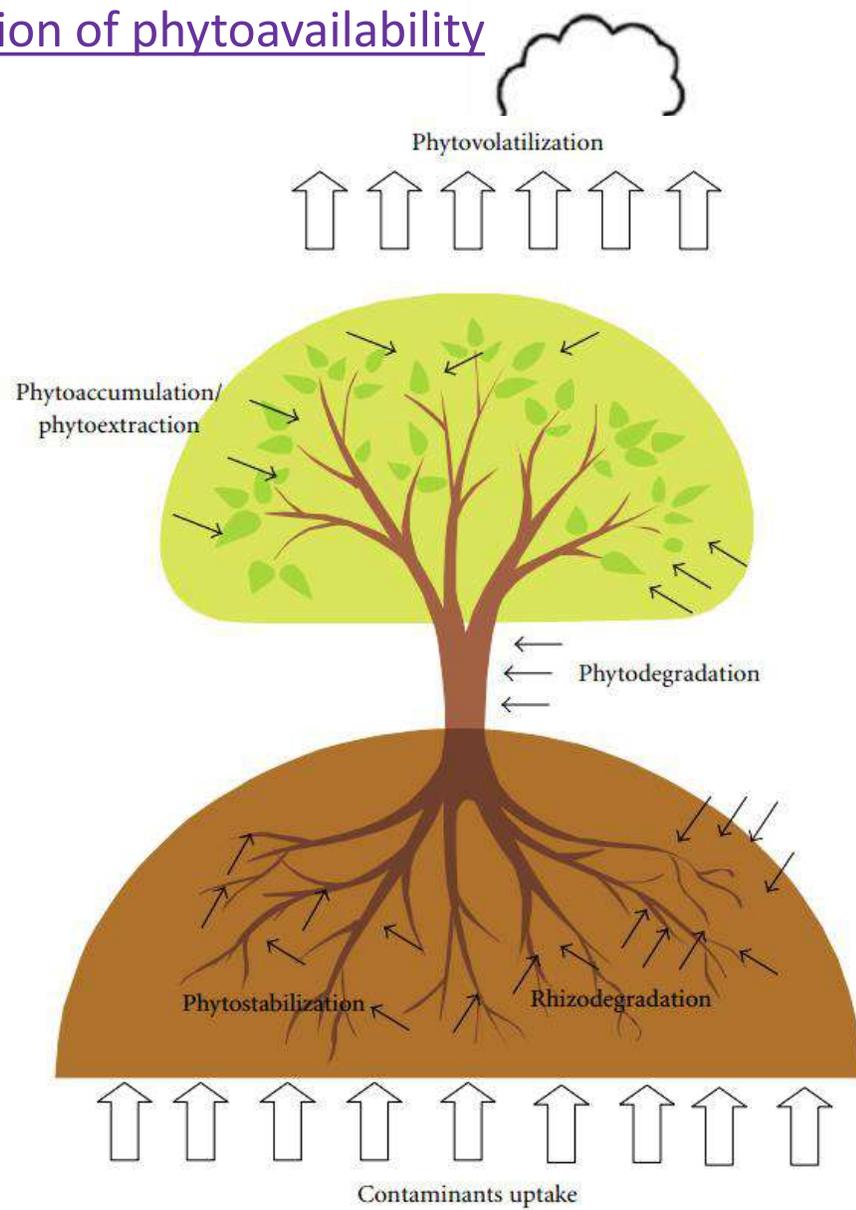


© Manceau et al. (2002)

NGB

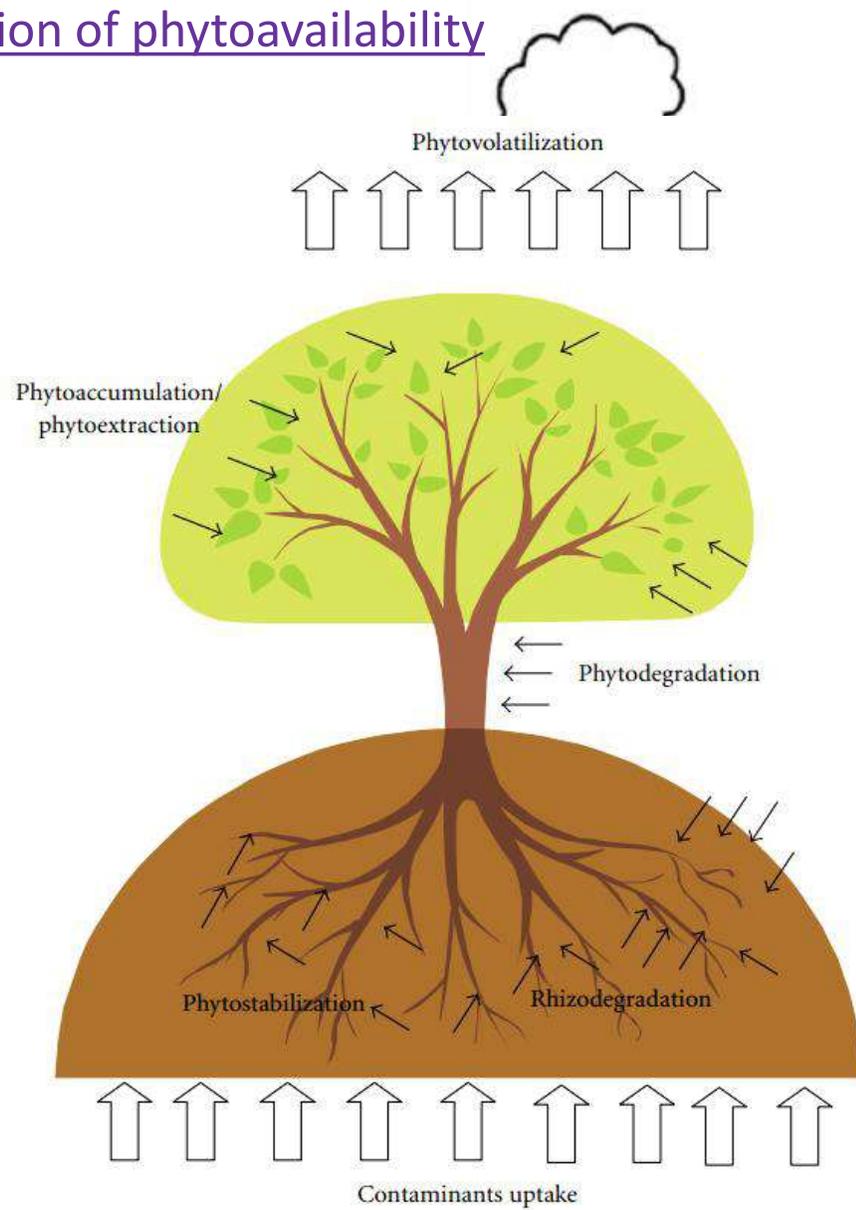


Notion of phytoavailability

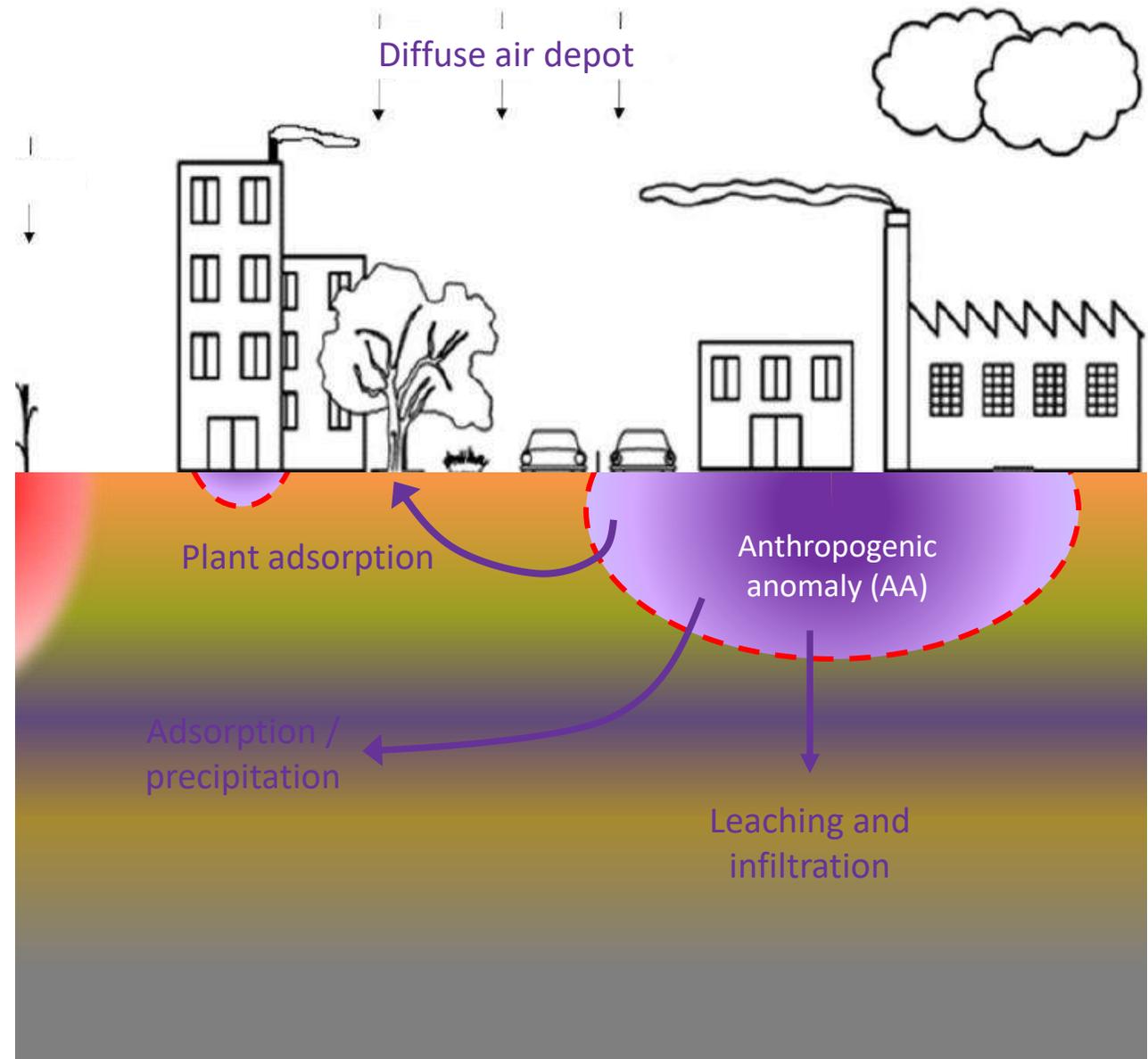


© Tangahu et al. (2011)

Notion of phytoavailability



© Tangahu et al. (2011)



But what about the behavior, propagation and fate of contaminants?