

Pollution de l'air Environnement et Santé



Nadine BERNARD
UMR CNRS 6249 et 6049
nadine.bernard@univ-fcomte.fr





Vous avez dit pollution de l'air!

I – Brève introduction
II- Focus recherche

Vue de Paris lors d'un pic de pollution, le 18 mars 2015.
REUTERS/GONZALO FUENTES

Existence de nombreuses définitions

Le Conseil de l'Europe a défini en 1967 comme polluant atmosphérique :

«toute substance étrangère ou dont la variation du taux dans l'atmosphère est susceptible de provoquer un effet nuisible, ou de créer une nuisance ou une gêne, compte tenu des connaissances scientifiques du moment».

Qualité de l'air altérée lorsque il y a variations de :
→ *[élément(s)] compris dans la composition théorique de l'air sec*
→ *composition des éléments présents dans l'air / composition théorique de l'air sec*

Observation du compartiment atmosphérique

Système non perturbé



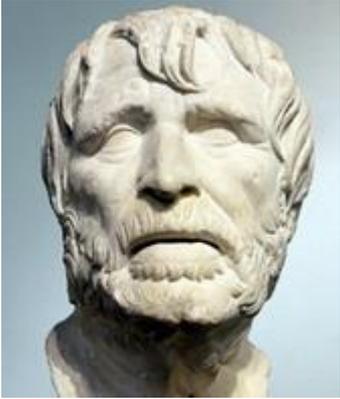
Atmosphère terrestre vue de l'espace (NASA, 2006)

Système perturbé



niveau d'alerte à la pollution aux particules fines (PM10) – 18/03/15

Problématique tardivement abordée ... Rome antique



Sénèque (-4 à 65)

« Dès que j'aurai laissé derrière moi *l'oppressant air de la ville et la puanteur des fumantes cheminées* qui, une fois leurs feux allumés, vomissent toutes les *pestilentes fumées et suies* qu'elles contiennent, je me sentirai tout à fait un autre homme » (Sénèque - Leygonie R., 1988).

Sources potentielles de polluants atmosphériques:

- combustion du bois
- utilisation du Pb, Cu, Hg (raffinage, fonderie)
- etc ...

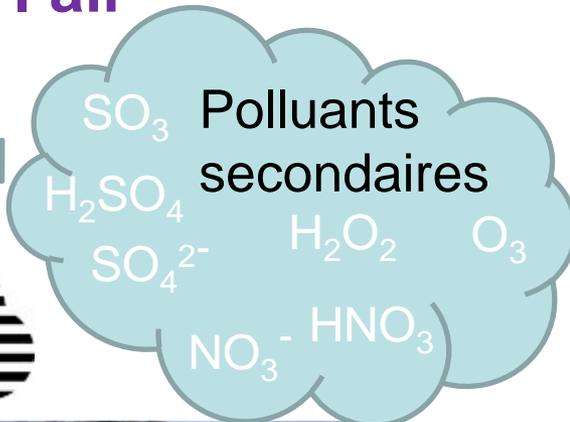
... Révolution industrielle

- utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole..)
- apparition des industries pétrochimiques, chimiques (molécules de synthèse, pesticides, nanoparticules...).



Types et sources de polluants de l'air

Pollution extérieure



Polluants primaires

- PM_{2,5}
- PM₁₀
- PM₁
- CO
- CO₂
- NO₂
- NO
- SO₂
- COV
- HAP



Sources naturelles



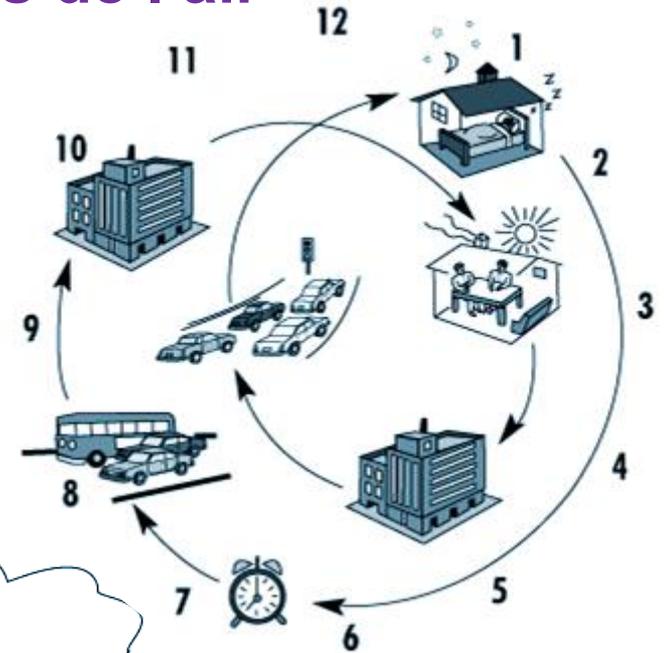
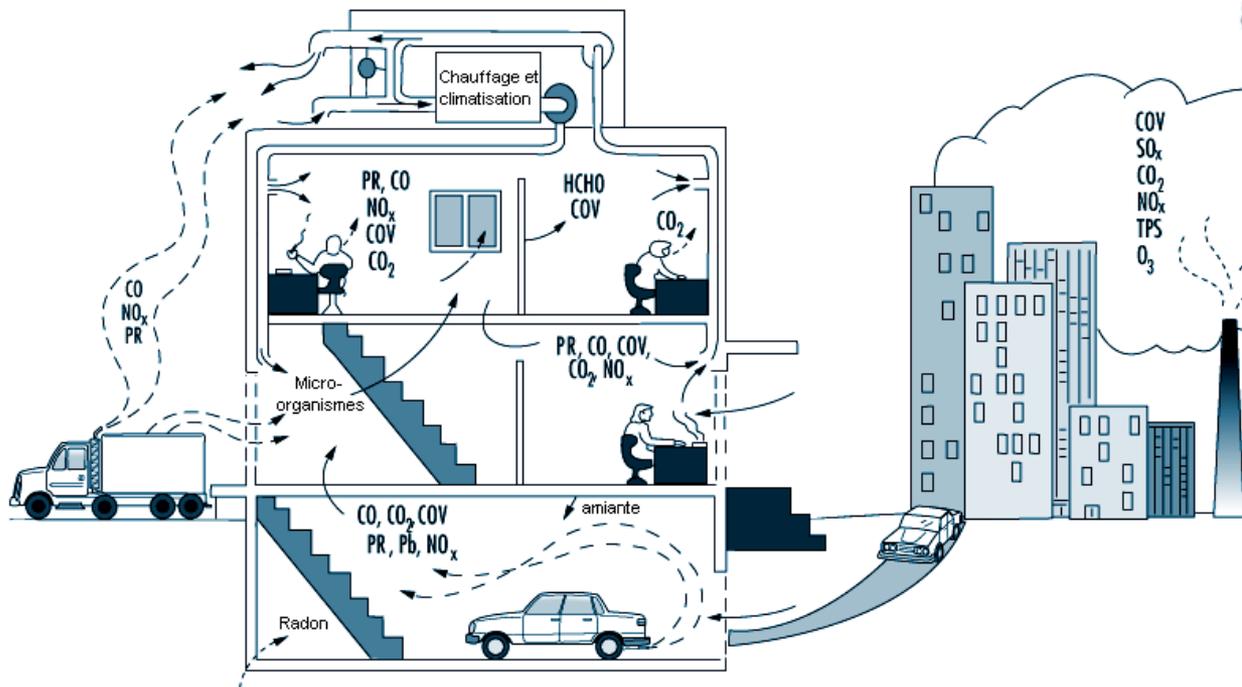
Sources anthropiques

Types et sources de polluants de l'air

Pollution intérieure

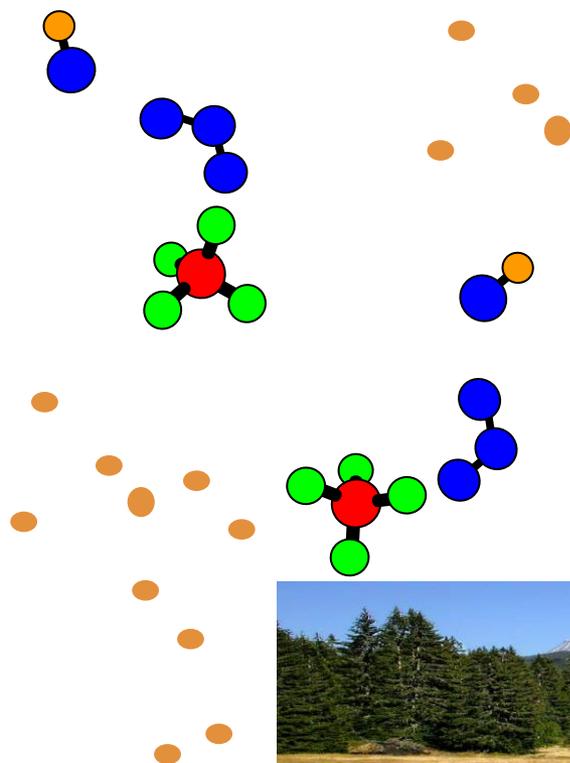
Citadins passent 80 à 90% de leur temps à l'intérieur des locaux.

Homme respire $\approx 15\ 000$ litres d'air / jour.



CO = monoxyde de carbone; CO₂ = dioxyde de carbone; COV = composants organiques volatils; HCHO = formaldéhyde; NO_x = oxydes d'azote; O₃ = ozone; Pb = plomb; PR = particules respirables; SO_x = oxydes de soufre; TPS = total des particules en suspension.

Expositions... organismes, populations, écosystèmes



Dépôt et accumulation (archives glaciaires)



Bio-accumulation



1500

1900

1940

1960

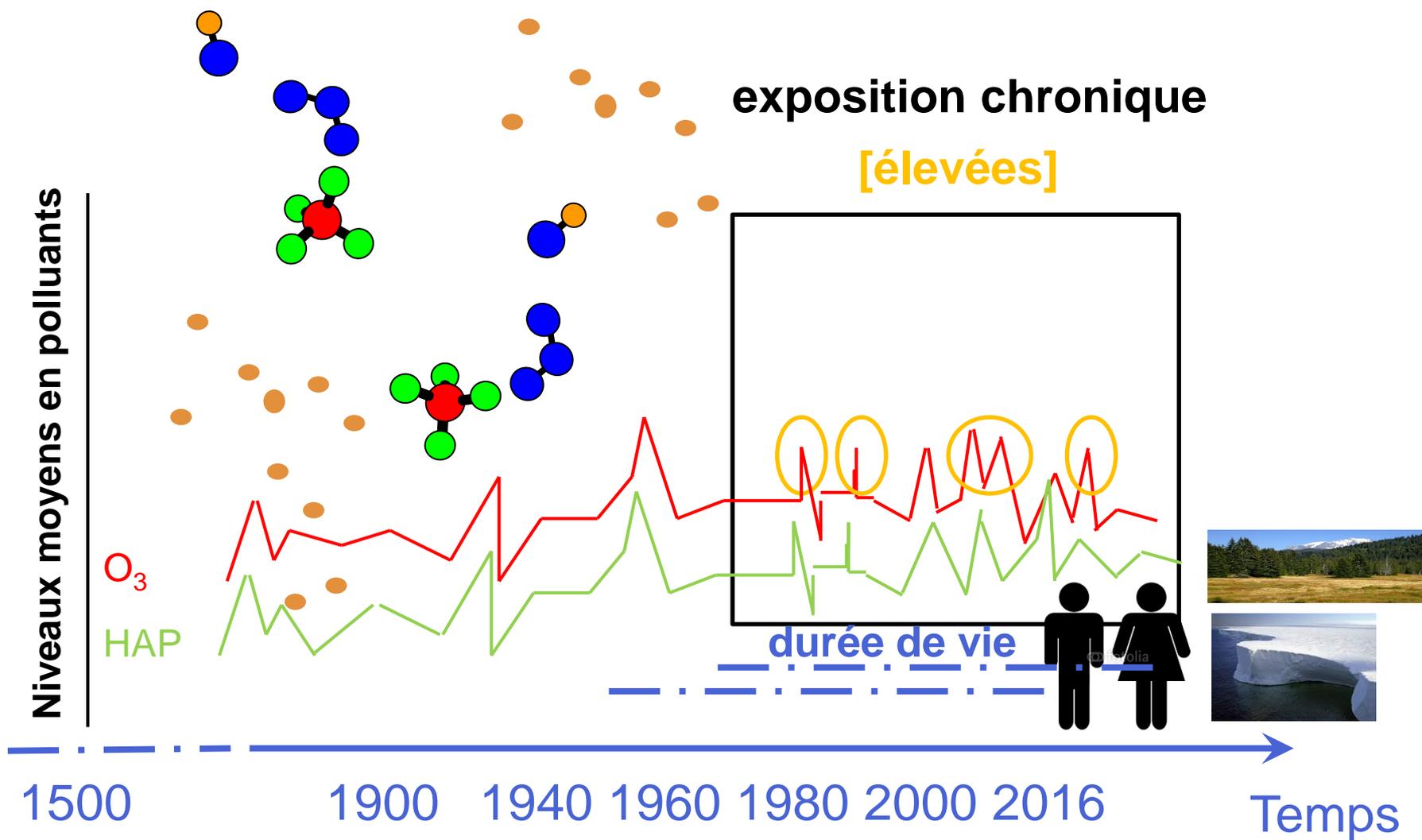
1980

2000

2016

Temps

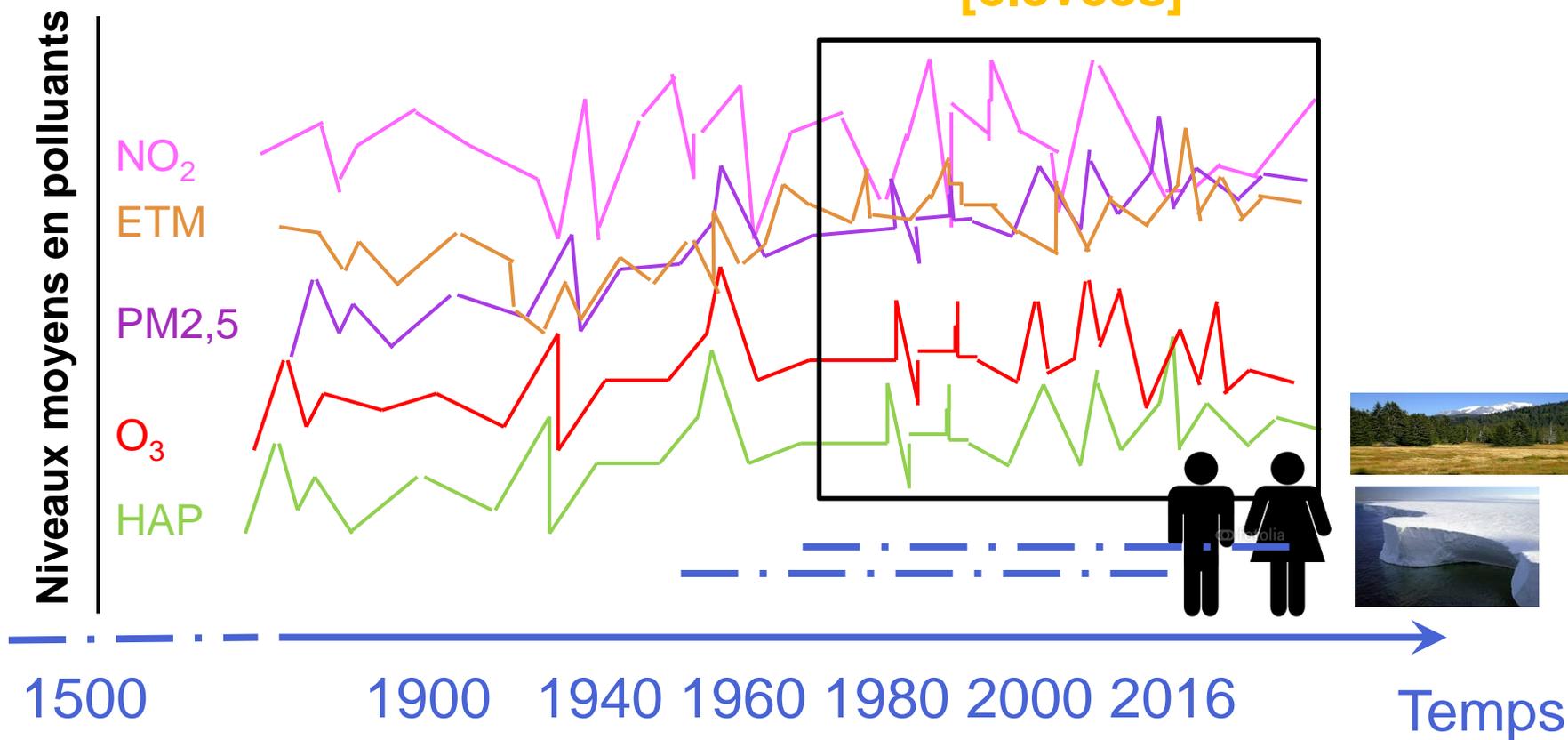
Expositions... organismes, populations, écosystèmes



Expositions... organismes, populations, écosystèmes

exposition chronique à
de multiples polluants

[élevées]

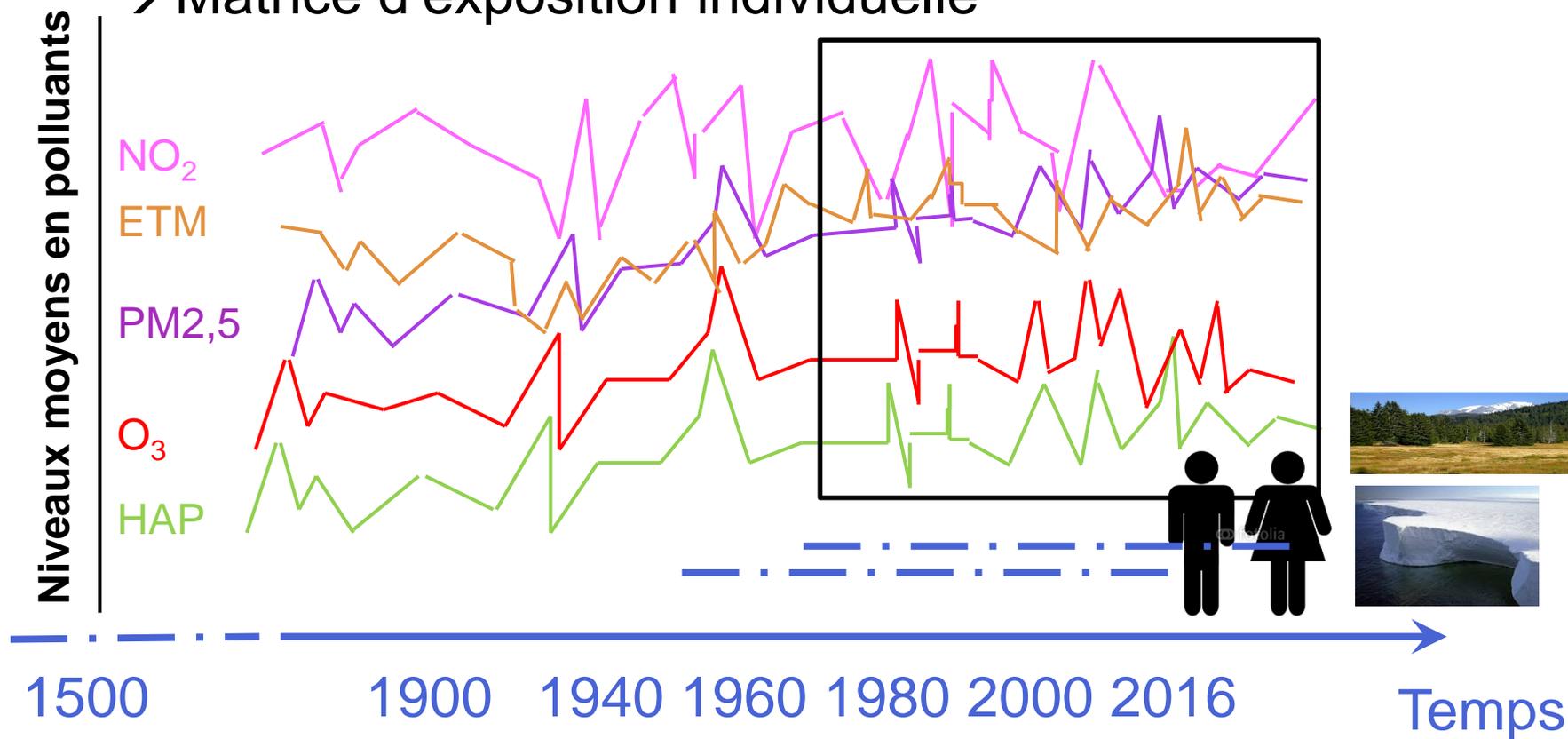


Expositions... organismes, populations, écosystèmes

Evaluation du risque sanitaire est calculée sur la part de chaque agent pris séparément

→ Effets des polluants : simple, additionnel, synergique

→ Matrice d'exposition individuelle





Quel est le coût de la Pollution atmosphérique ?



Un homme porte un masque, à Mexico.
PEDRO PARDO / AFP

Coût économique et financier



Les Conséquences économiques de la **pollution de l'air extérieur** : sans politiques et mesures rigoureuses, la pollution atmosphérique **pourrait chaque année entraîner d'ici à 2060 le décès prématuré de 6 à 9 millions de personnes...** et **coûter 2 600 milliards de dollars** (2 280 milliards d'euros).



Commission d'enquête Sénat - 15 juillet 2015

Coût de la pollution de l'air évalué à 101,3 milliards d'euros / an
Coûts non sanitaires (conséquences sur les bâtiments, les écosystèmes et l'agriculture) **≈ 4,3 milliards d'euros / an.**
Coût sanitaire ≈ 68 à 97 milliards d'euros / an.

Coût sanitaire



« évaluation quantitative d'impact sanitaire » - juin 2016

La **pollution de l'air est responsable de 48 000 morts /an en France.**

Principaux responsables de décès prématurés : particules fines et ozone.

Elle constitue un problème de santé publique majeur. Troisième cause de mortalité en France, derrière le tabac (78 000 décès) et l'alcool (49 000 décès).



En 2012, la pollution de l'air a été responsable d'un décès sur huit au niveau mondial, soit environ 7 millions de morts – plus que le tabagisme.

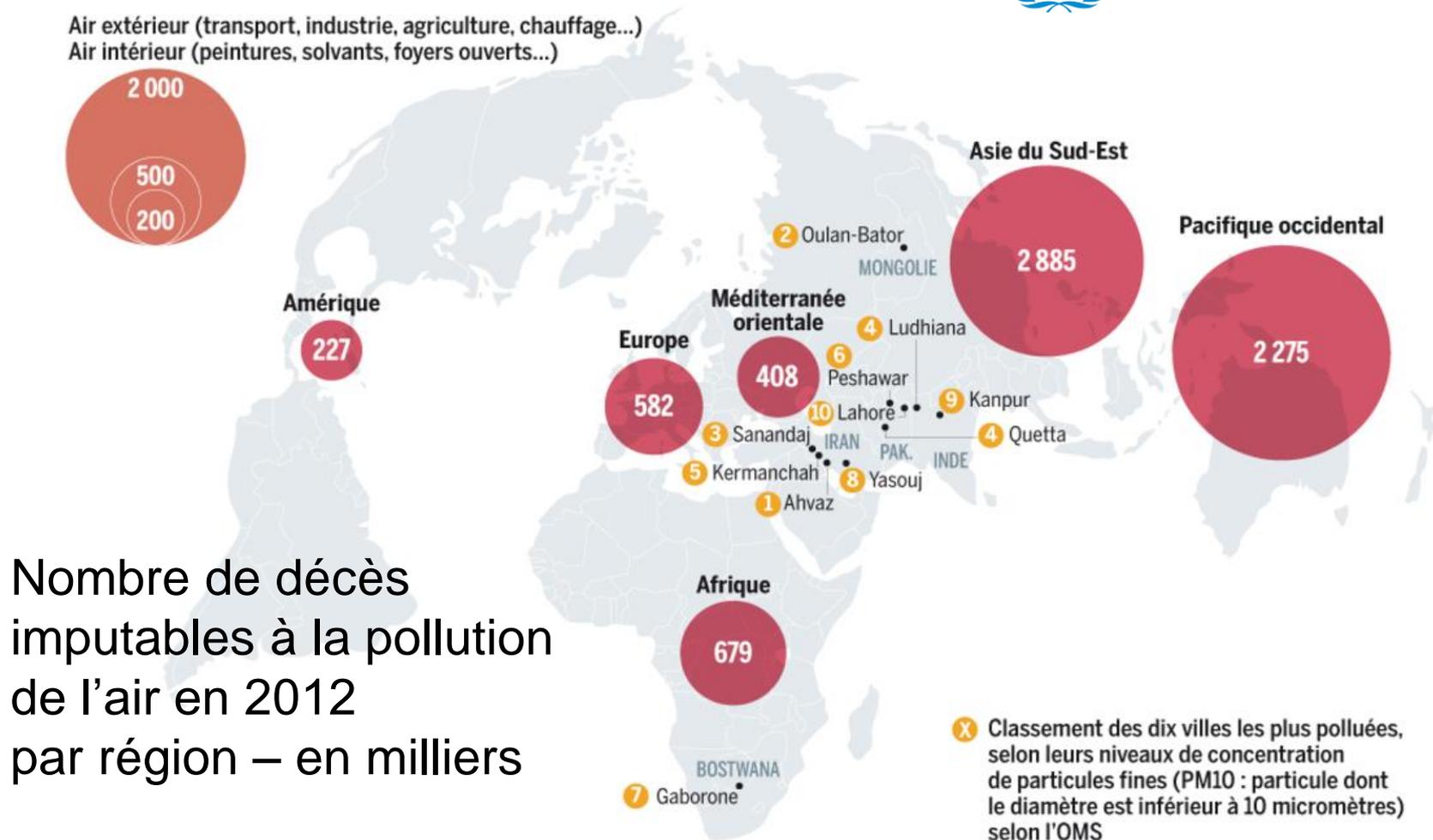
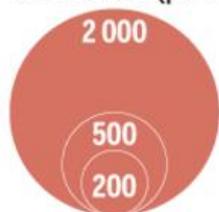
L'OMS estime que « **la mauvaise qualité de l'air est désormais le principal risque environnemental pour la santé dans le monde** » (communiqué du 25 mars 2012).

Estimation de la surmortalité attribuable à la mauvaise qualité de l'air – données mars 2012



L'Asie, la région la plus touchée

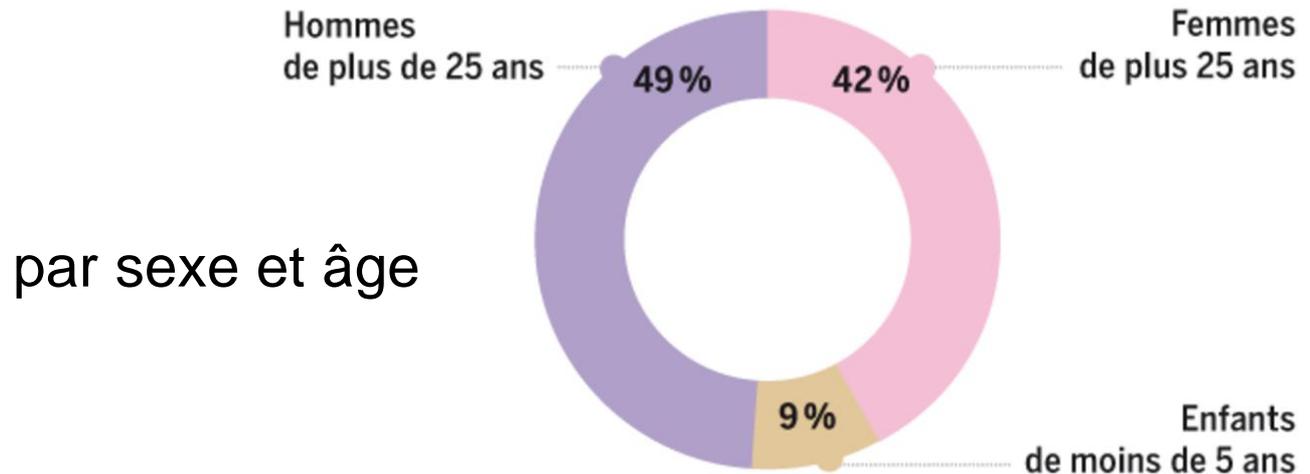
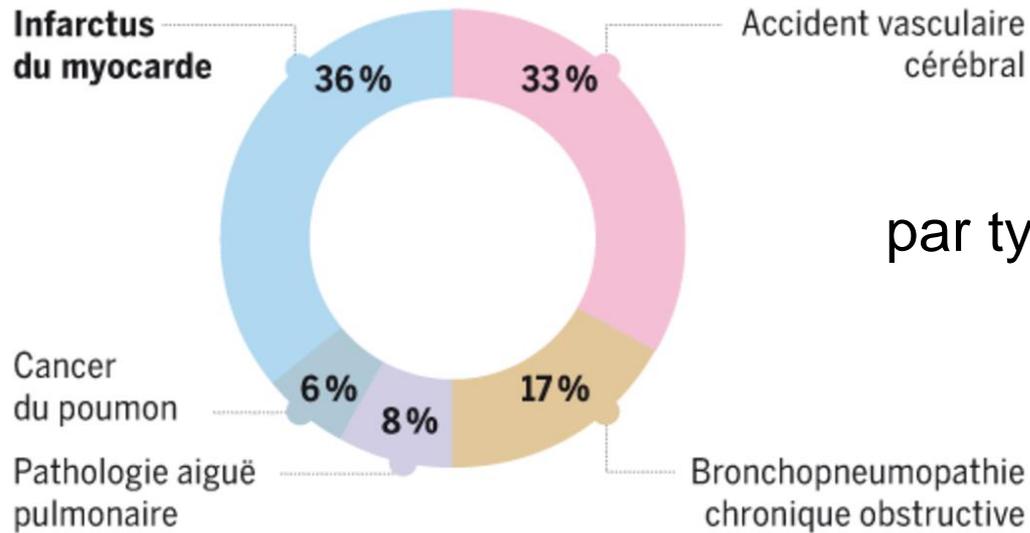
Air extérieur (transport, industrie, agriculture, chauffage...)
Air intérieur (peintures, solvants, foyers ouverts...)



Nombre de décès imputables à la pollution de l'air en 2012 par région – en milliers

X Classement des dix villes les plus polluées, selon leurs niveaux de concentration de particules fines (PM10 : particule dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres) selon l'OMS

Répartition des décès attribuables à la pollution de l'air



SOURCE : OMS



Contexte : multi-exposition

Quels sont les problématiques et les questionnements dans ce contexte de multi-exposition environnementale?



Un homme porte un masque, à Mexico.
PEDRO PARDO / AFP

Multi-exposition

→ problématique émergente

Expositions simultanées

→ grande complexité

Nature des polluants, interactions, cinétiques

Multiplicité des voies et types d'exposition

→ cadre conceptuel évolutif

Mesures ↔ modélisations

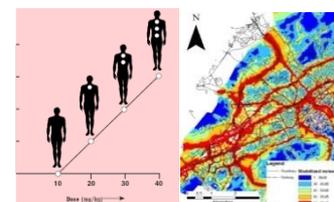
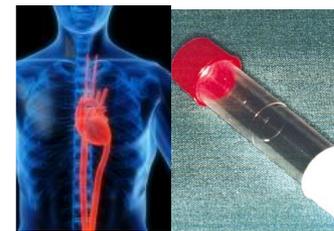
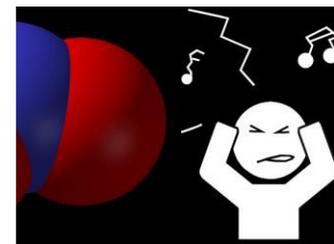
Exposition → évaluation des risques

→ impacts écologiques et effets sanitaires

Pathologies / polluants

Niveaux d'organisation biologique (organisme ↔ écosystème)

Echelles spatiales et / ou temporelles



Défis méthodologiques

Maîtrise des outils analytiques et des modèles d'émission/diffusion

Définition des échelles pertinentes

Quantification de la multi-exposition

Approche métrologique

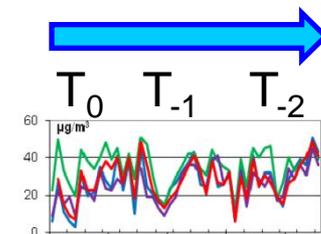
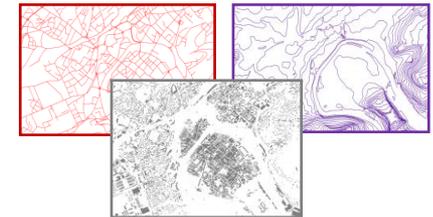
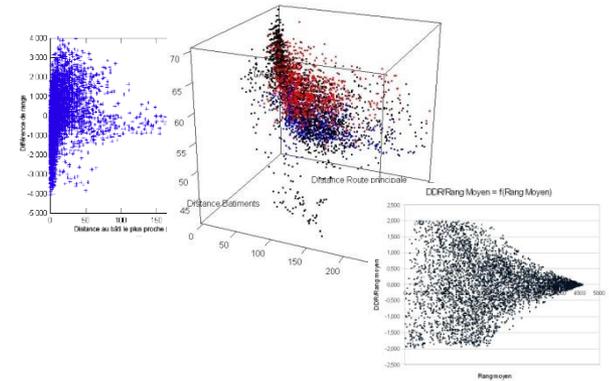
Métriques de la multi exposition à n polluants
Descripteurs du poste de travail ou du paysage
(typologie de la zone d'étude)

Approche spatiale

Choix des données sources → modélisation
Prise en compte de multiples agents
Identification des situations propices/néfastes

Approche temporelle

Mesure simultanée de polluants à T_0 et recherche de
bio-indicateurs, de bio-intégrateurs
Etude rétrospective et recherche de paléo-indicateurs





Vous avez dit pollution de l'air!

II- Focus sur des recherches pluridisciplinaires

Vue de Paris lors d'un pic de pollution, le 18 mars 2015.
REUTERS/GONZALO FUENTES



Multi-exposition

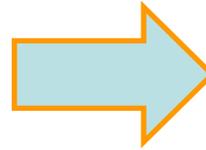


Particules atmosphériques
(PM₁₀, ETM, Pollens, ...)

Gaz atmosphériques
(NO₂, O₃, HAP, COV, ...)

Bruit

AGENTS

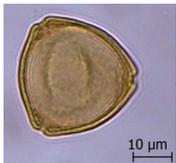


CIBLES

Organismes

Populations

Ecosystèmes



Evaluation/prévention des risques



- *Métrieologie, Chimie, Géographie, Ecologie urbaine, Ecotoxicologie ...*
- *Collaborations essentielles pour des études pluridisciplinaires*



Multi-exposition



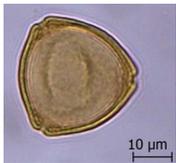
Contaminants atmosphériques
(éléments nutritifs, ETM, HAP)

AGENTS



CIBLES

Tourbières à sphaignes/
microorganismes



Evaluation/prévention des risques

Utilisation des tourbières à sphaignes pour la quantification des dépôts de contaminants atmosphériques à longue distance et pour la mesure de leur impact sur l'environnement



Problématique

Transport et dépôt – conditions actuelles

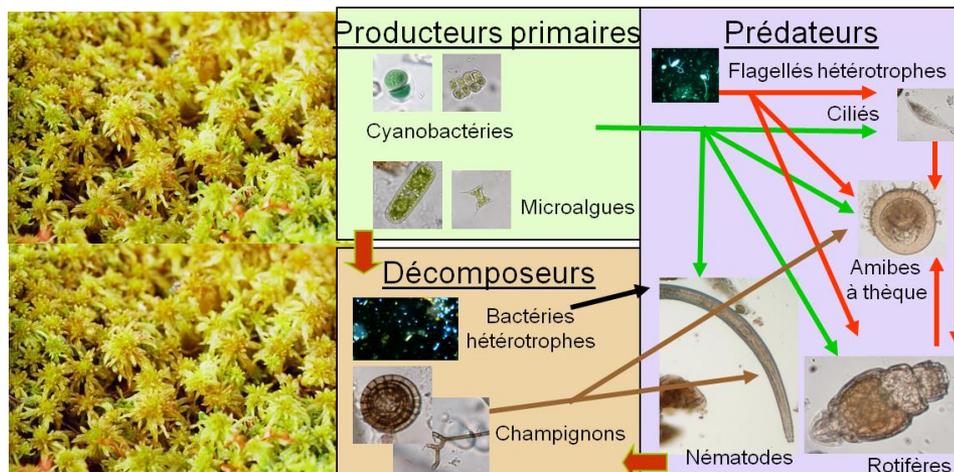


- Quelle est l'origine des polluants issus d'un transport à longue distance ?
- Quels sont les impacts sur les écosystèmes « isolés » ?



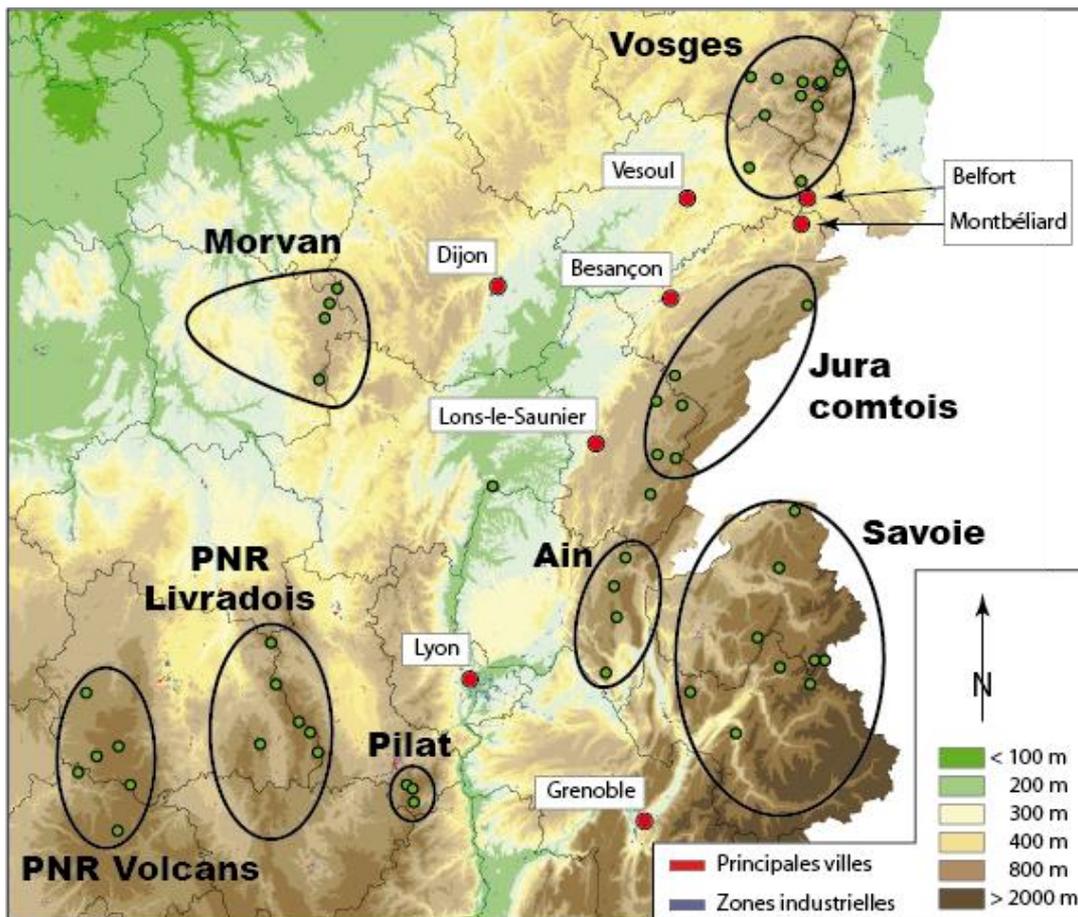
Tourbières à sphaignes

- Ecosystèmes homogènes
- Présents à l'échelle du territoire national
- Eloignés des sources primaires de polluants atmosphériques
- Sphaignes : bons biocapteurs de polluants
- Microécosystèmes Bryophytes / microorganismes



→ Biointégrateurs
(sensibilité à
l'échelle de la
communauté)

53 tourbières françaises échantillonnées en septembre 2010



Sphagnum capillifolium

Sphaignes (capitulum 0-3 cm)
≈ croissance 1 année



Analyses

[N, P]

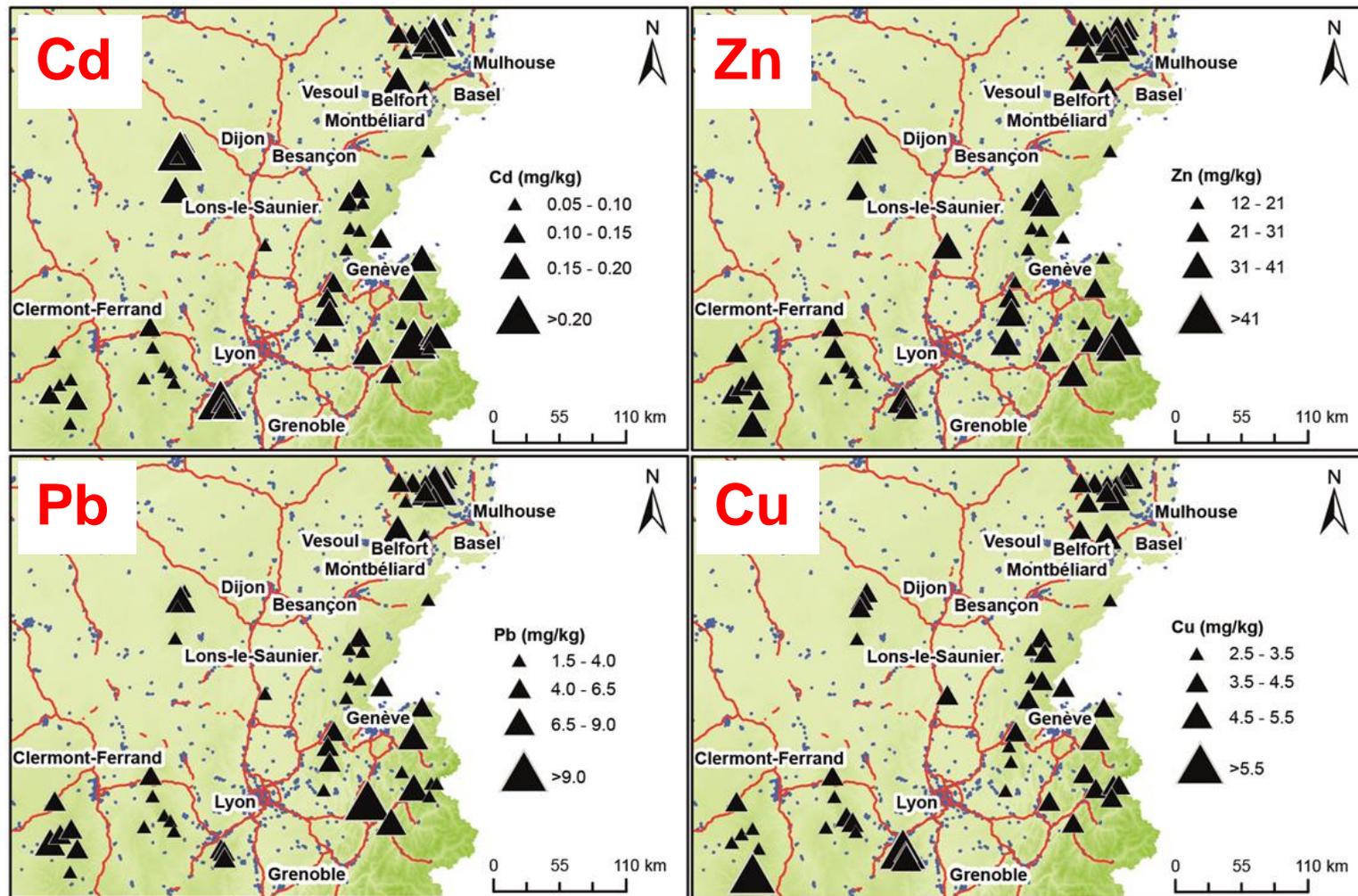
[ETM]

[HAP]



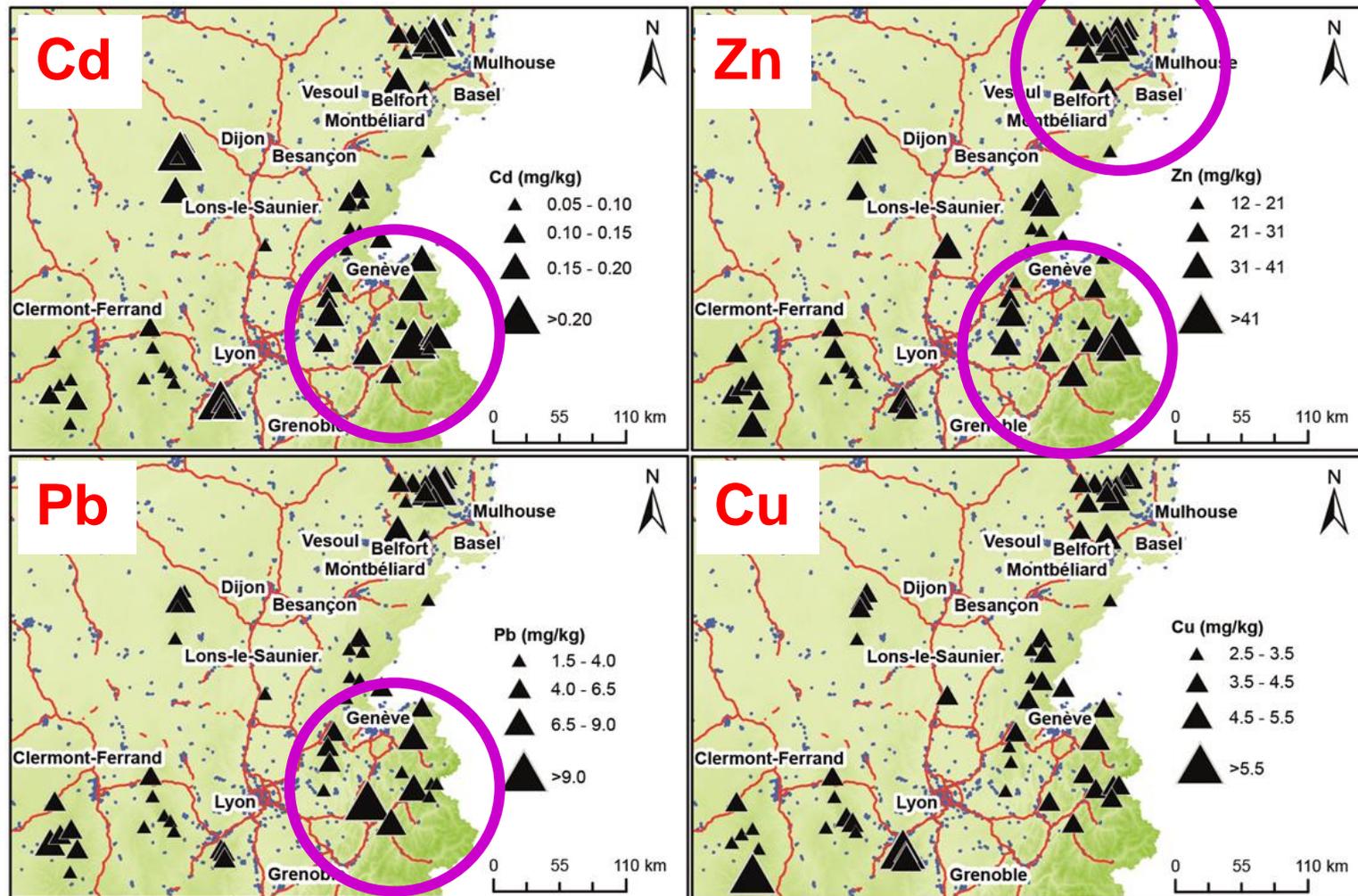
**Modèle
de dépôt**

Concentrations des dépôts d'ETM présents à la surface des tourbières



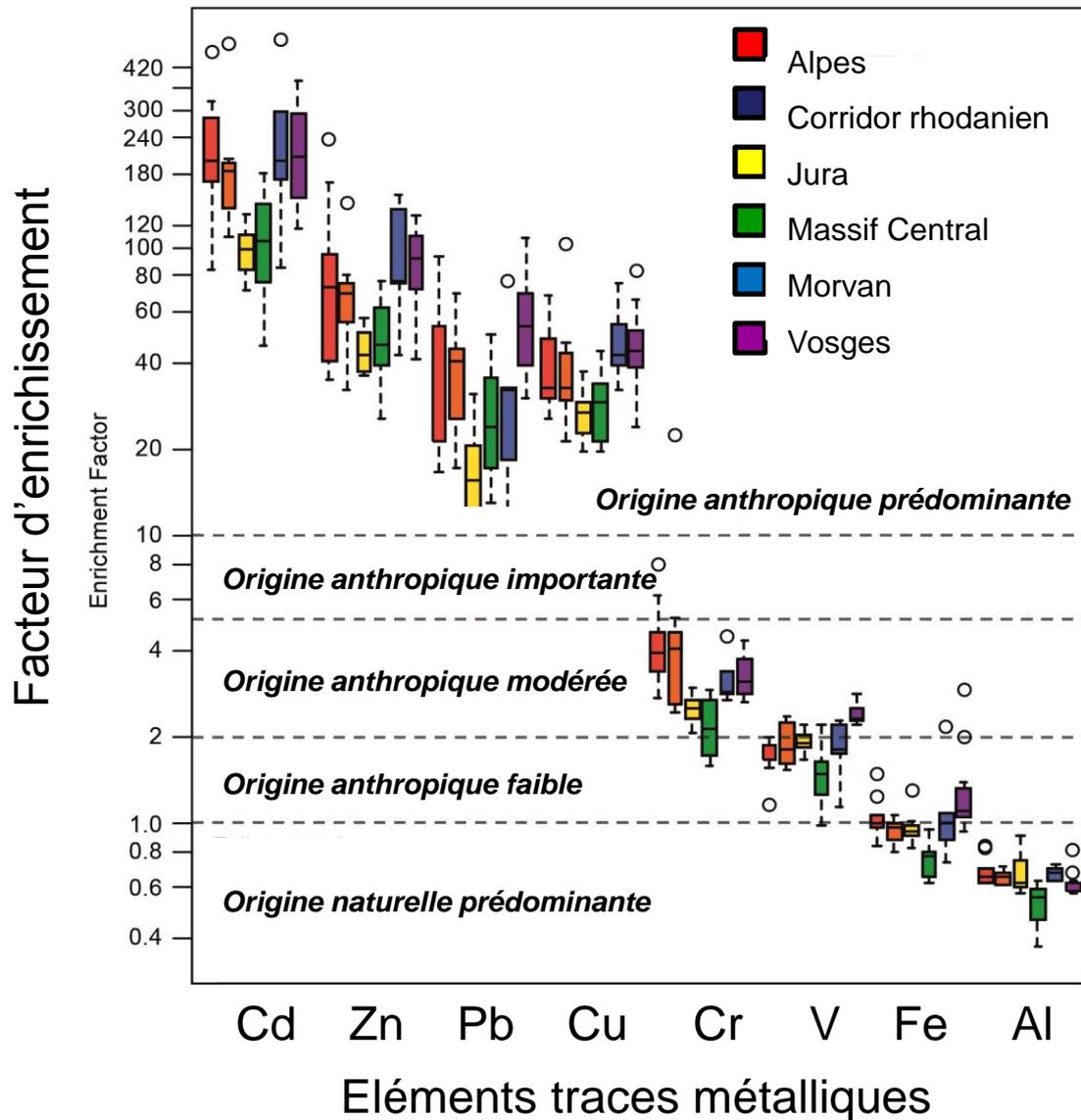
(mg.kg^{-1} de mousse sèche) Meyer et al, Atmospheric Environment (2015)

Concentrations des dépôts d'ETM présents à la surface des tourbières



($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de mousse sèche) Meyer et al, Atmospheric Environment (2015)

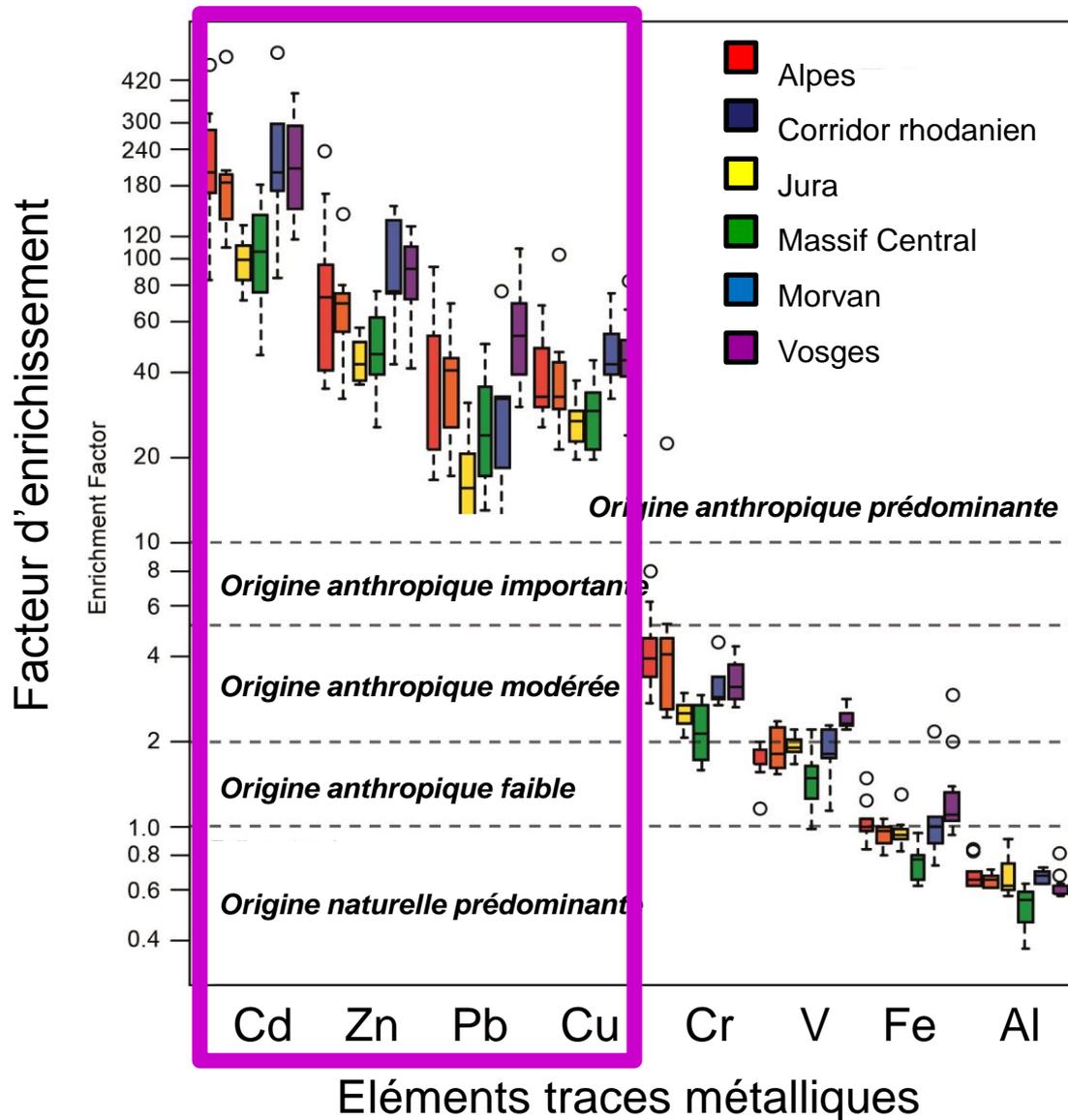
Quantification de l'origine anthropique des éléments traces métalliques présents à la surface des tourbières



Boxplots des facteurs d'enrichissement d'éléments traces en utilisant Ti comme élément de référence (lithophile).

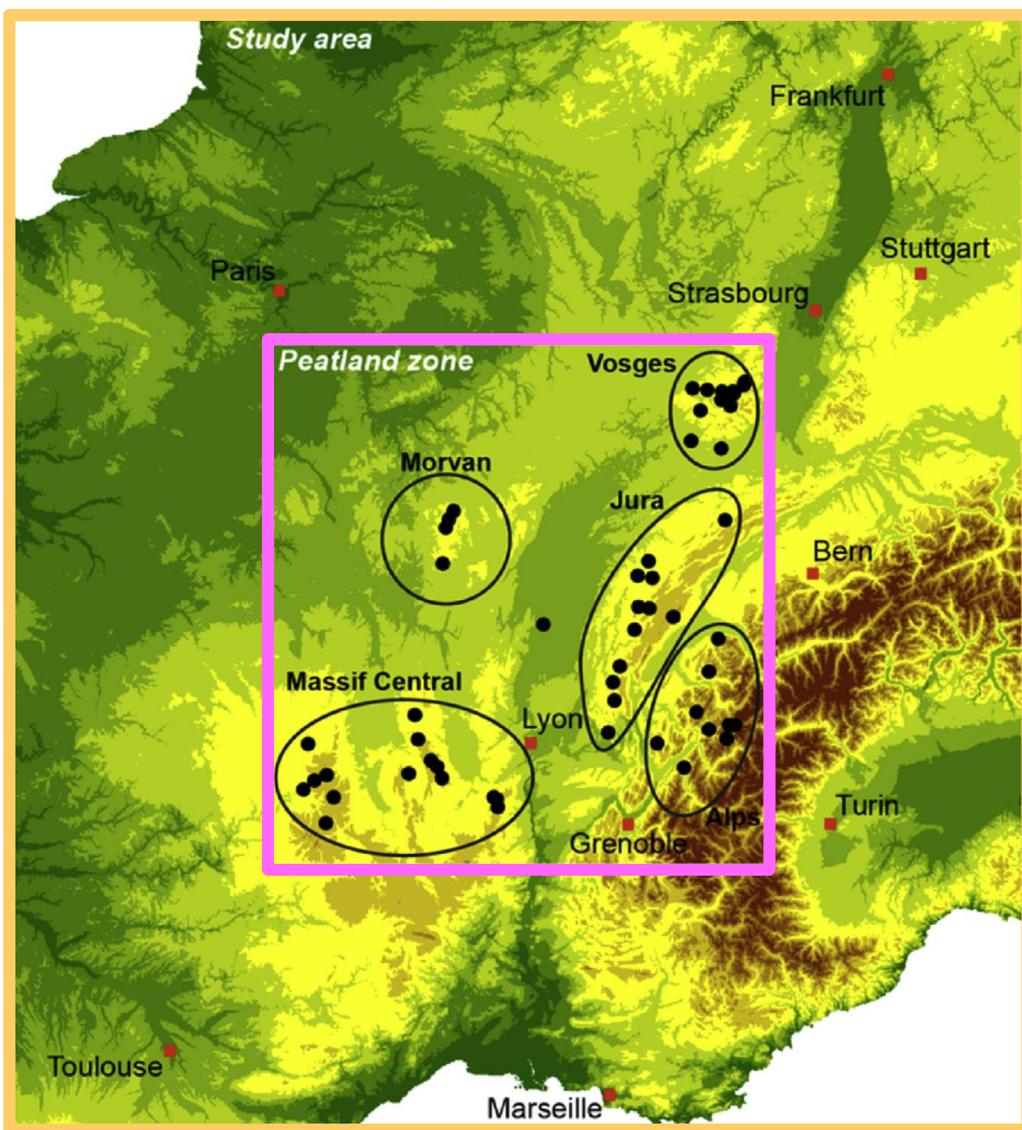
Meyer et al, Atmospheric Environment (2015)

Quantification de l'origine anthropique des éléments traces métalliques présents à la surface des tourbières

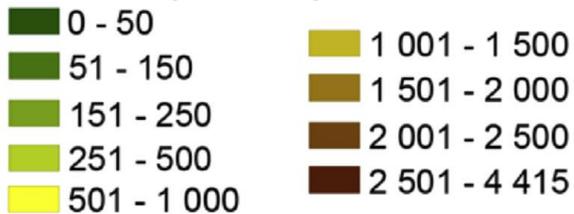


Boxplots des facteurs d'enrichissement d'éléments traces en utilisant Ti comme élément de référence (lithophile).

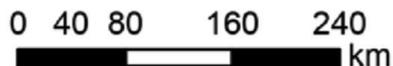
Meyer et al, Atmospheric Environment (2015)



Altitude (m a.s.l.)



• Peatlands



Prise en compte de la
pollution
transfrontalière



**Modèle
de dépôt**

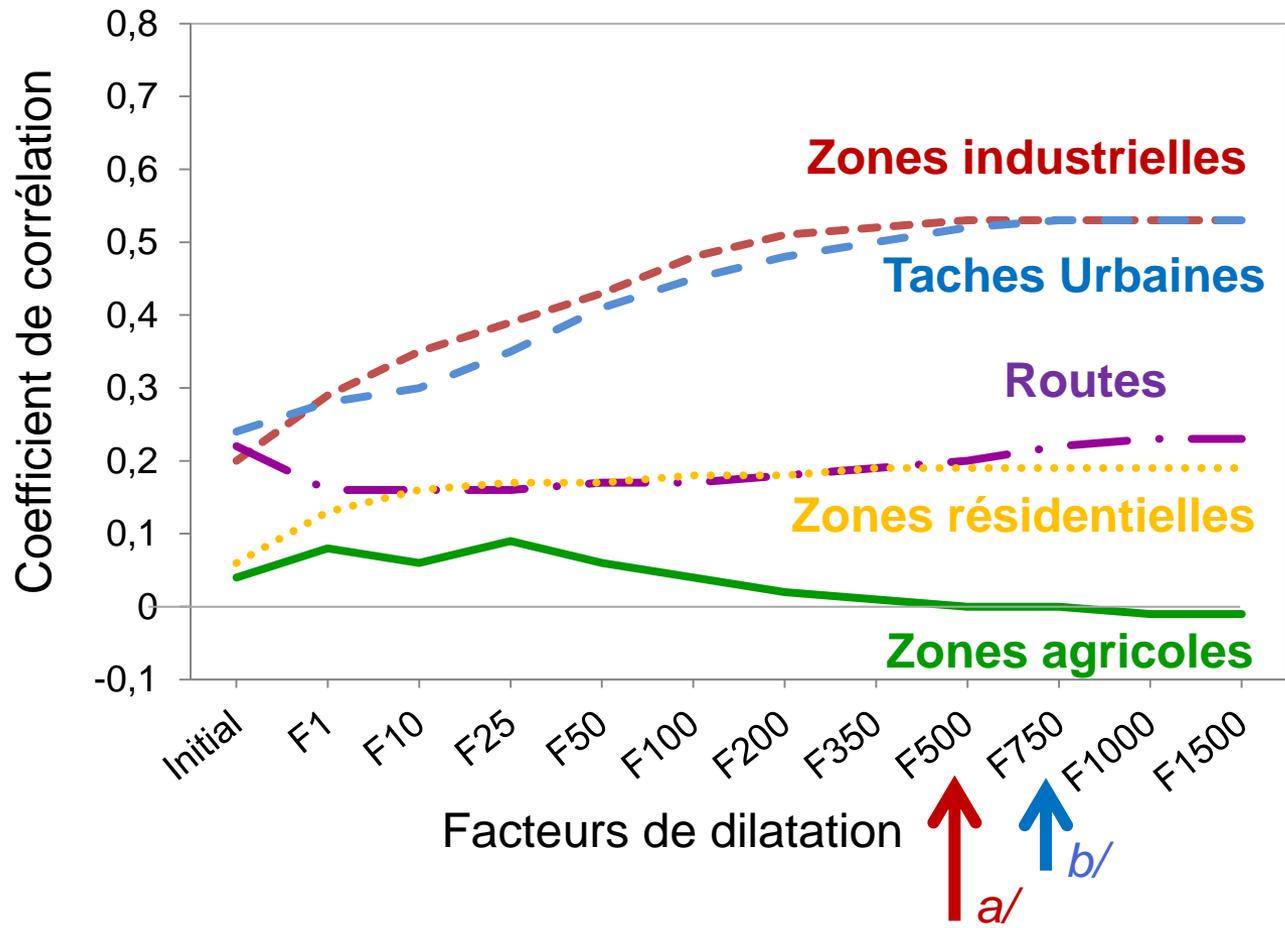
aire
d'étude

zone de
tourbières

→ PM_{10} mesurées en
532 stations sur cet
espace européen

*Diaz-de-Quijano M. et al., Environmental
Pollution 214 (2016) 8-16*

Simulation des distances théoriques de dispersion des PM₁₀ par secteur d'émission



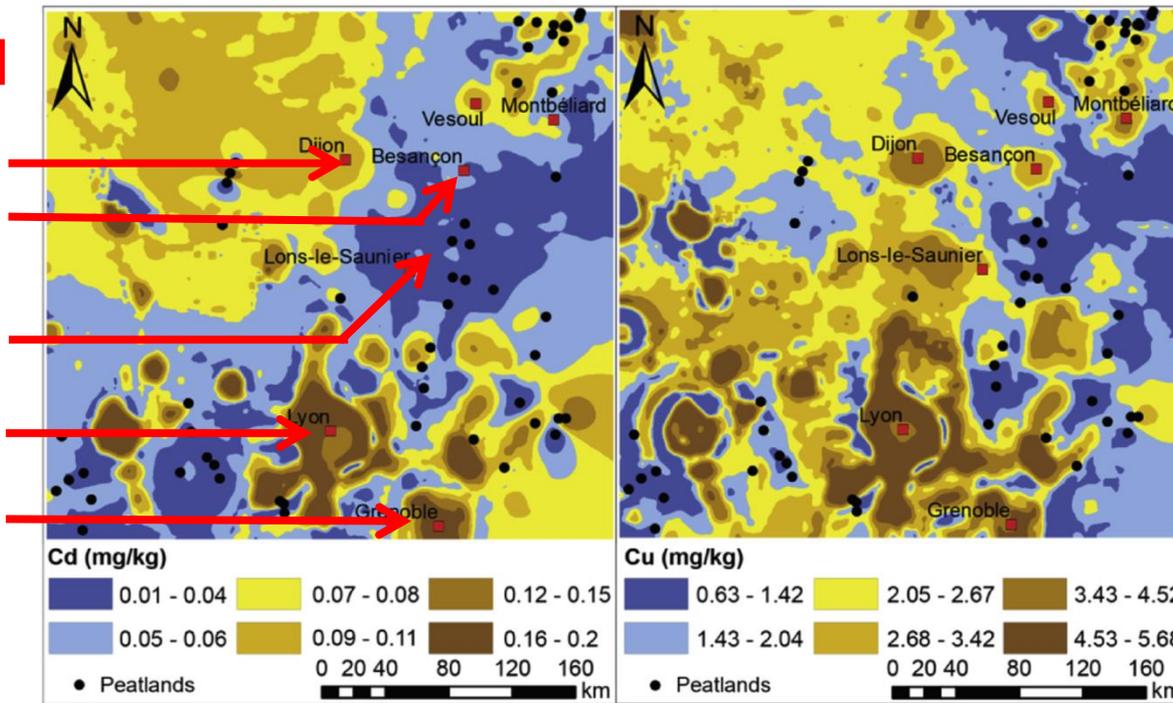
Distance de dispersion des polluants qui explique le mieux la variance spatiale des PM₁₀ mesurées est de :

- a/ 16,7 km (F500) zones industrielles
- b/ 13,4 km (F750) taches urbaines

Coefficients de corrélation entre les PM₁₀ mesurées en 532 stations de l'espace européen et des données d'émission par secteur qui ont été modélisées pour simuler leur dispersion théorique autour de leurs points de diffusion.

Cd

Dijon
Besançon
Lons-le-Saunier
Lyon
Grenoble



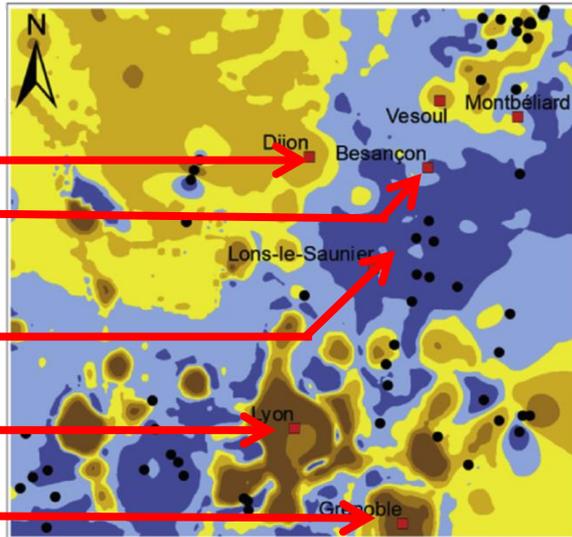
Cu

**Modélisation
des dépôts
issus d'un
transport à
longue
distance**

Estimations
d'accumulations
annuelles de Cd,
Cu, Pb, Zn dans
S. capillifolium
obtenues par
application de
regressions
locales.

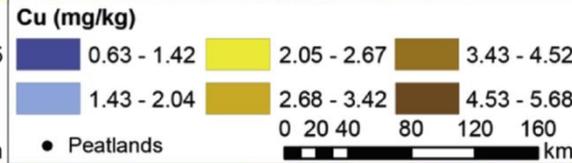
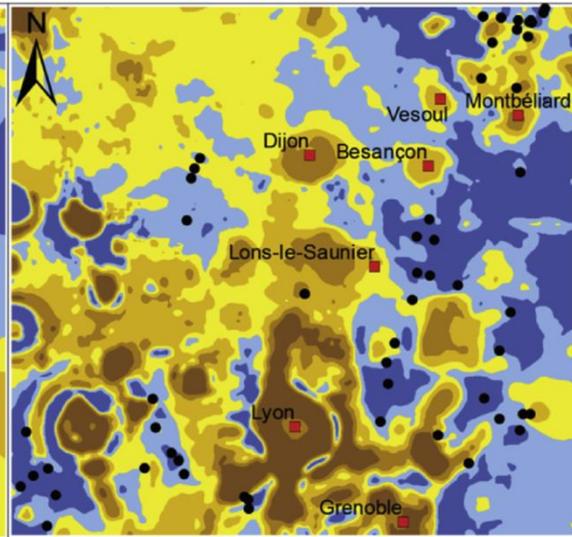
Cd

Dijon
Besançon
Lons-le-Saunier
Lyon
Grenoble

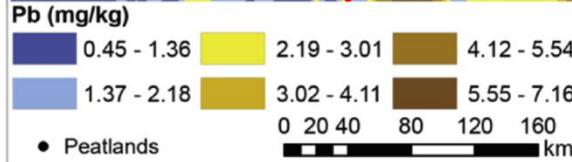
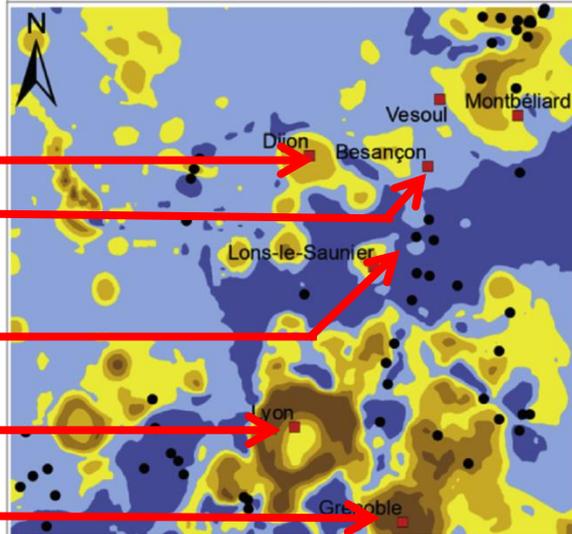


Cu

Modélisation des dépôts issus d'un transport à longue distance

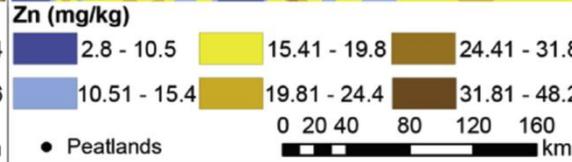
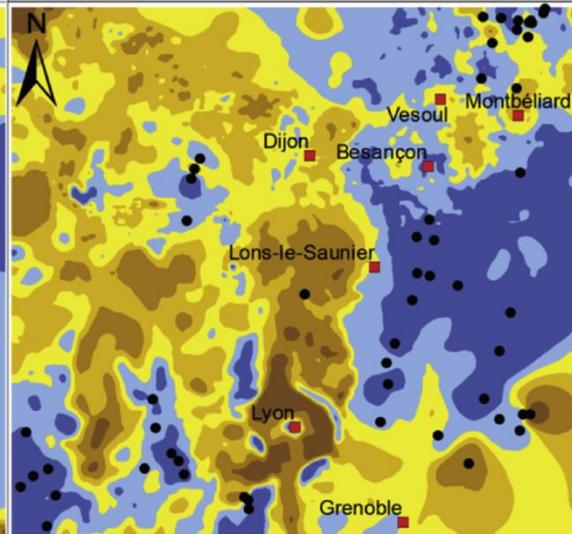


Dijon
Besançon
Lons-le-Saunier
Lyon
Grenoble



Estimations d'accumulations annuelles de Cd, Cu, Pb, Zn dans *S. capillifolium* obtenues par application de regressions locales.

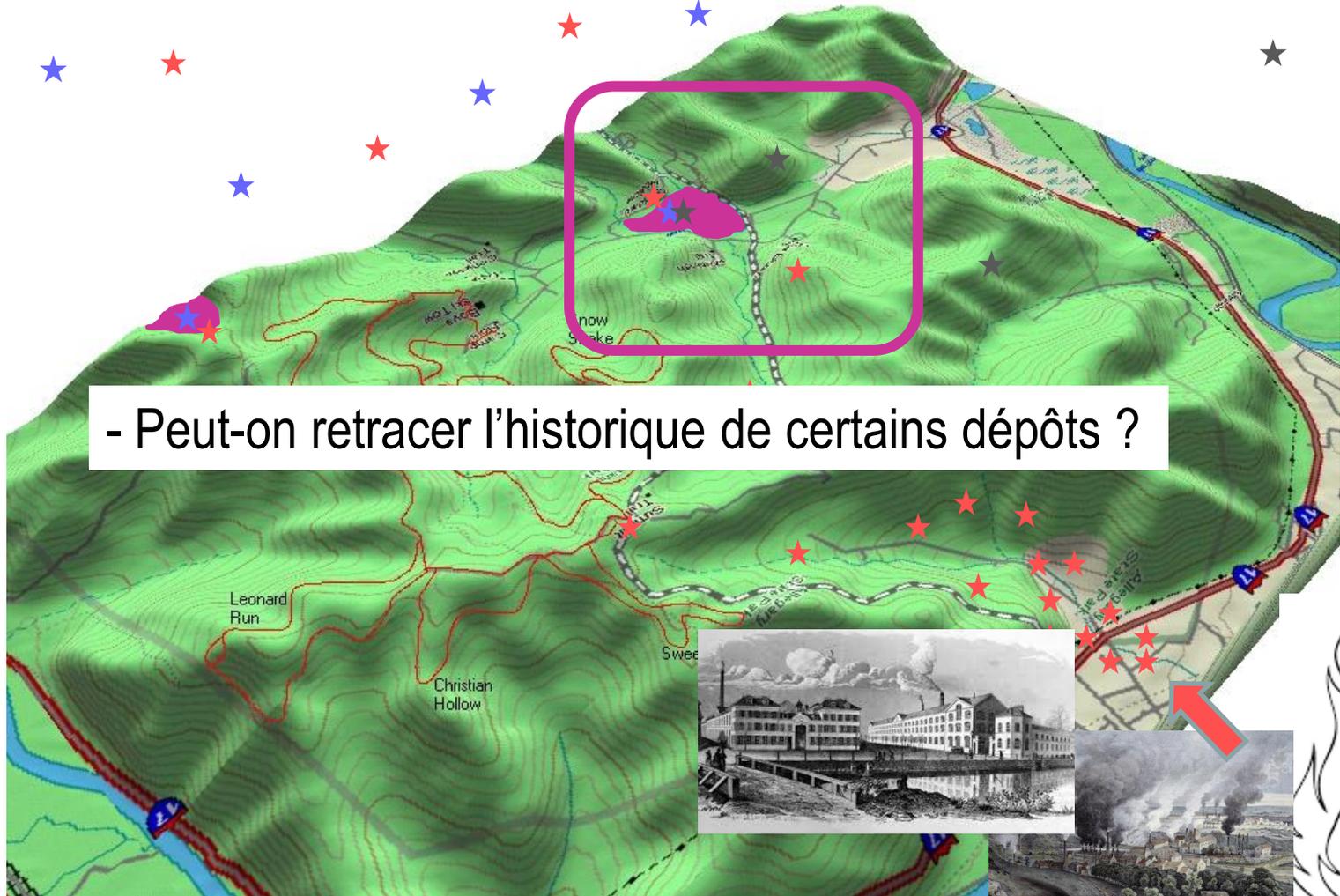
Pb



Zn

Problématique

Transport et dépôt – conditions du passé



- Peut-on retracer l'historique de certains dépôts ?



Historique des dépôts

Prélèvements en tourbières pour l'évaluation de l'évolution au cours du temps des concentrations en ETM et HAP et recherche de microorganismes indicateurs.



ss.
échantillons

Chronologies



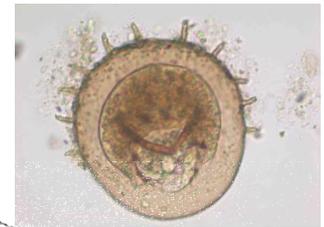
[ETM], [HAP]
[éléments lithophiles]

dernier siècle :
 ^{210}Pb , ^{137}Cs

extrapolée en
profondeur :
radiocarbone



Sphaignes :
analyses
μorganismes



Tourbe :
analyses de restes
de certains groupes
μbiens (→ impacts
dépôts historiques)



carotte de tourbe

Dendrogramme des concentrations en éléments chimiques (mg.g⁻¹) au cours du temps dans la tourbe.

Tourbière de Ténine (Vosges)



Résultats soumis pour publication donc
non présentés ici



Multi-exposition



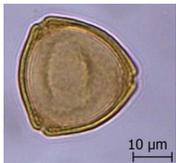
Grains de pollen / Eléments
Traces Métalliques (ETM)

AGENTS

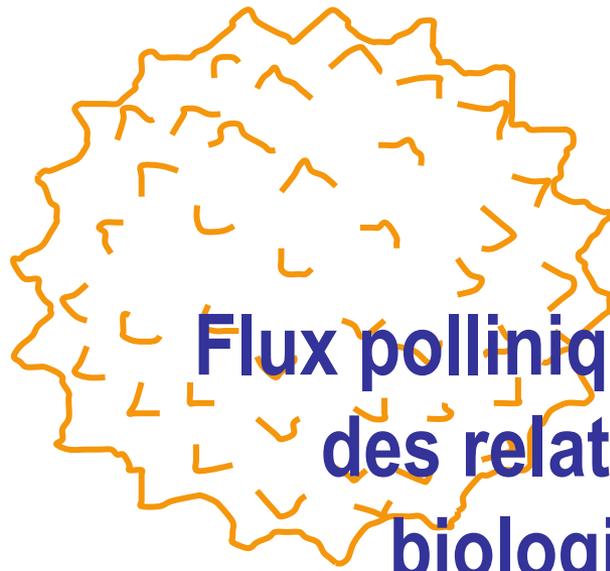


CIBLES

Adultes/enfants

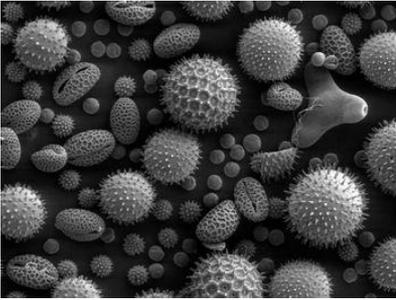


Evaluation/prévention des risques



Flux polliniques allergisants et étude des relations entre pollutions biologiques et chimiques

Problématique



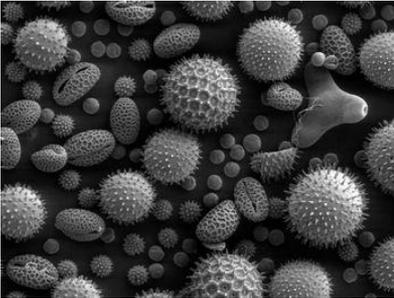
- Les flux polliniques allergisants (nature, abondance) varient-ils selon l'urbanisation des milieux ?



Ville

Campagne

Problématique

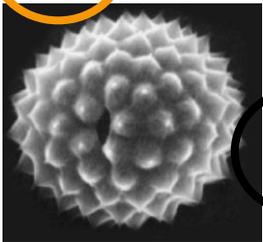


- Les flux polliniques allergisants (nature, abondance) varient-ils selon l'urbanisation des milieux ?



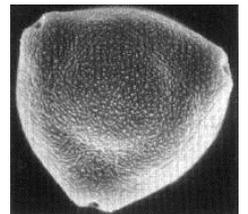
Ville

Campagne



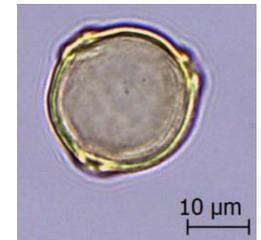
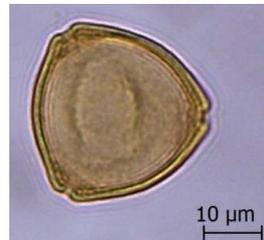
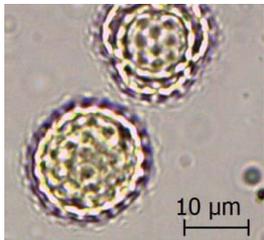
- Existe-t-il des interactions entre grains de pollen et polluants atmosphériques (éléments traces métalliques)?

- Si oui, est-ce que l'association pollens/contaminants va renforcer ou non le facteur d'allergénicité ?



Grains de pollen

- ▶ Enveloppe externe très résistante (sillon, ouverture, pore...)
- ▶ Caractéristiques propres à un seul taxon
- ▶ Pollinoses appréhendées (surtout pollen anémophile)
- ▶ Potentiel allergisant (PA) de 0 à 5 (codification du RNSA)



Ambrosia artemisiifolia
Ambroisie

Corylus avellana
Noisetier

Plantago lanceolata
Plantain

Quercus petraea
Chêne

Poa sp.
Poacée

Betula pubescens
Bouleau

23 µm PA=5

27 µm PA=3

28 µm PA=3

30 µm PA=4

35 µm PA=5
(RNSA, 2005)

27 µm PA=5

Gradient ville-campagne

- Les flux polliniques allergisants (nature, abondance) varient-ils selon l'urbanisation des milieux ?

Variable explicative : NO_2 (indicateur du trafic routier)



Ville

Campagne

Paris
Lyon

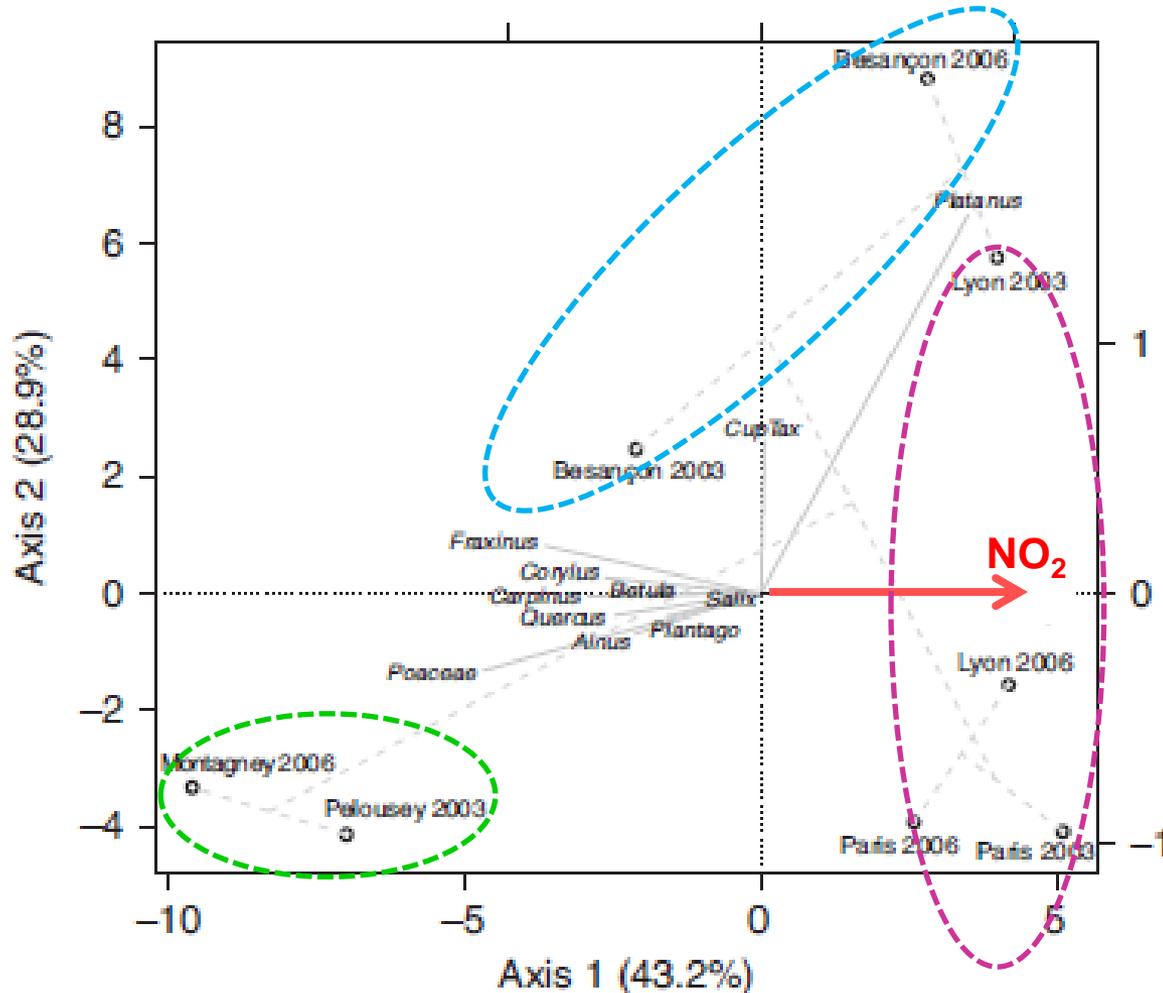
Besançon

Pelousey
Montagney

années : 2003 – 2006

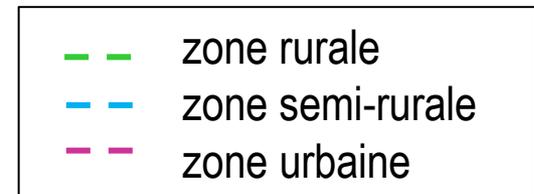
— —	zone rurale
— —	zone semi-rurale
— —	zone urbaine

Gradient ville-campagne



Analyse de redondance partielle de 11 taxons de pollen allergisants avec la concentration NO₂ (variable explicative) et l'année d'étude (covariable qualitative).

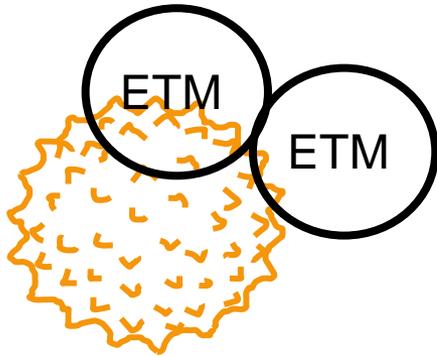
Bosch-Cano F. et al., 2011



- ▶ Les pollens sont plus abondants en zones rurales
- ▶ En zones urbaines, les arbres d'ornement produisent des pollens allergisants (Platanus : PA : 4/5 ; Cupressaceae-Taxaceae (cyprès, thuya) : PA : 5/5)

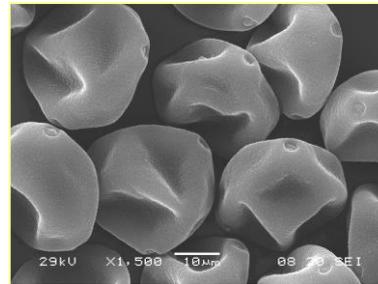
Associations grains de pollen – ETM

- Exposition de grains de pollen **en conditions contrôlées** par nébulisation de particules de plomb

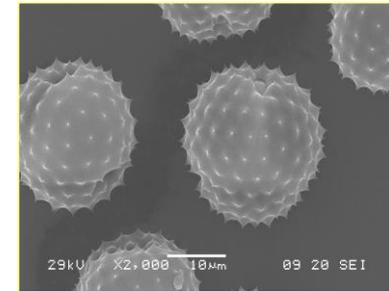


Noisetier

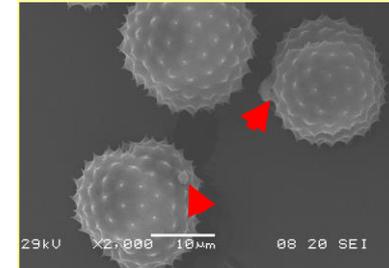
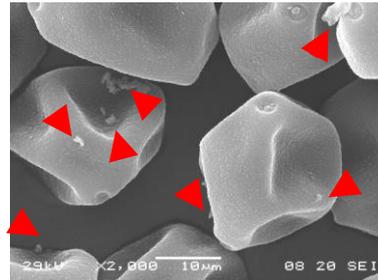
Non exposés



Ambroisie



Exposés

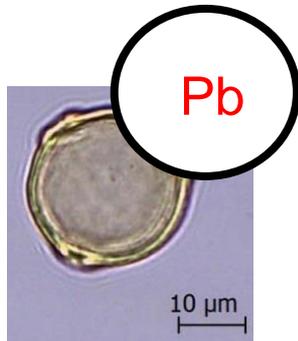


Pb

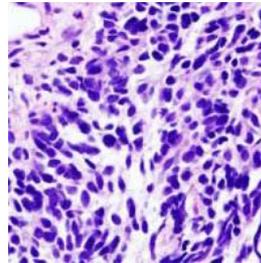
Observations au microscope électronique à balayage
puis analyse par micro-sonde

→ Association est corrélée positivement avec la
durée d'exposition et [ETM]

Associations grains de pollen – ETM facteur d'allergénicité ?



+



*Complexe Pb
-Betula sp.*

Cellules épithéliales
bronchiques d'origine
humaine

Etudier la réaction du
système immunitaire

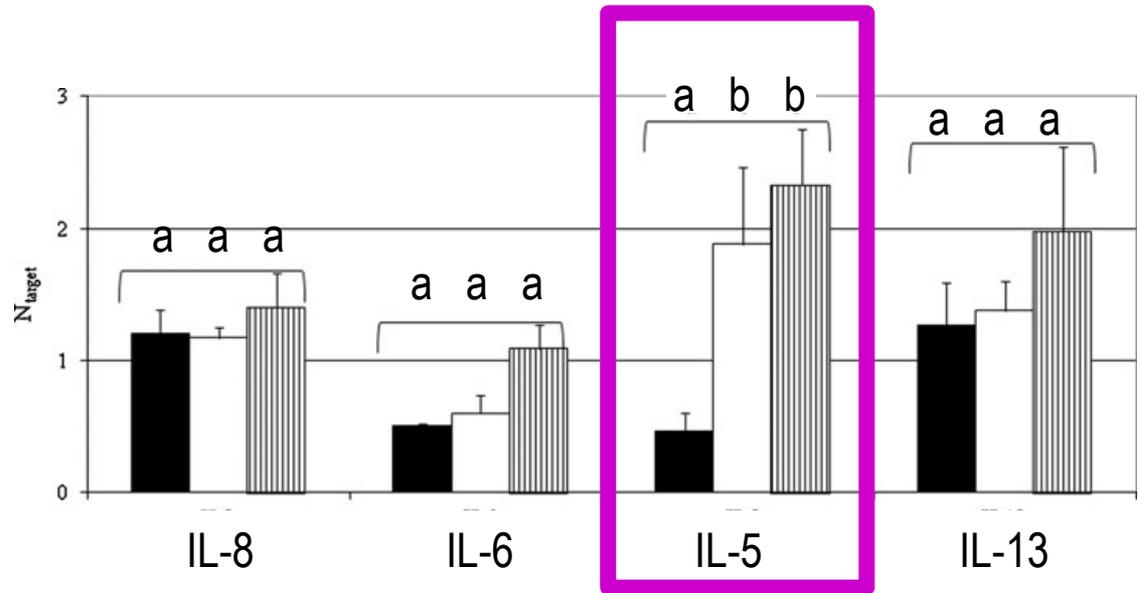
Mesurer niveaux ARNm
de 4 médiateurs des
cytokines :
2 inflammatoires (IL8 et
IL6) et 2 allergiques
(IL-5 et IL-13).

- exposition [Pb] :
native BCG : contrôle
BCG-30 : 30 mg/L de Pb
BCG-60 : 60 mg/L de Pb
- durée d'exposition : 2, 4, 6h

Associations grains de pollen – ETM facteur d'allergénicité ?

Expression standardisée de l'ARNm à partir de cellules A549 des gènes codant pour les interleukines (*méthode Act avec deux gènes de référence*).

→ Réaction du système immunitaire (surexpression significative de la protéine IL5 après 6h d'exposition [Pb])

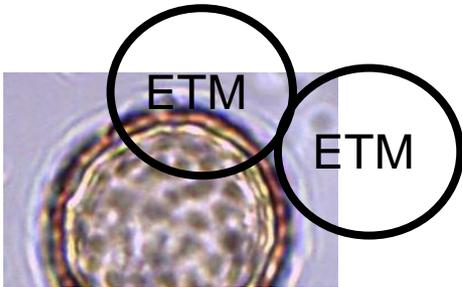


BPG : Birch pollen grains (bouleau)

■ 6H native BPG □ 6H BPG 30 ▨ 6H BPG 60

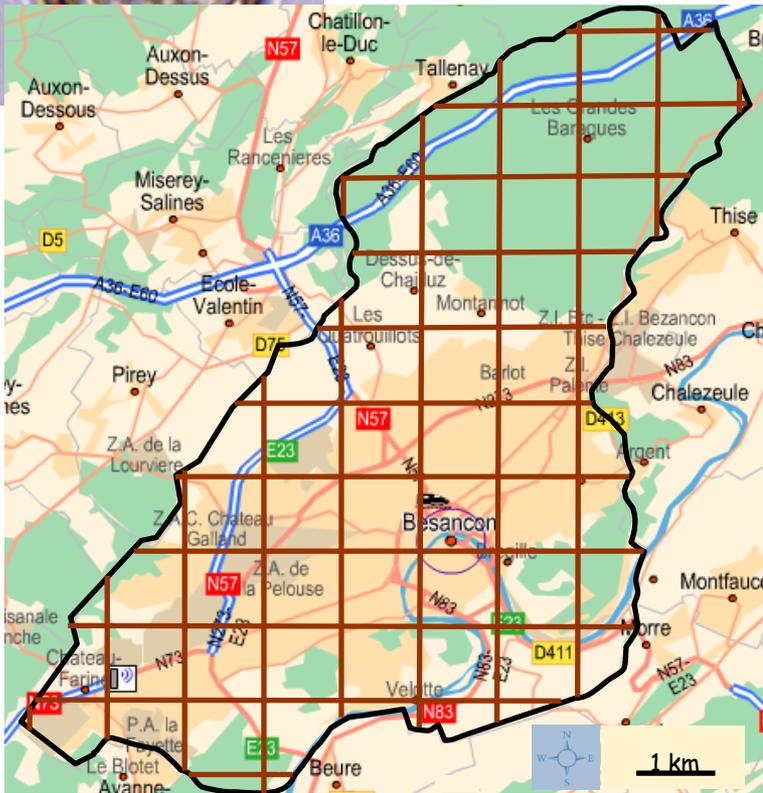
Moyenne ± SEM-Test de Mann-Whitney

Associations grains de pollen – ETM



- Exposition de grains de pollen *in situ*

Echantillonnage systématique de
Plantain moyen (*Plantago media*)
PA 3/5



Commune de Besançon (25)



Mailles : 0,5 km/1 km

→ 28 échantillons de
300 plants

Résultats soumis pour publication donc
non présentés ici

Multi-exposition



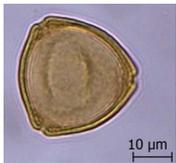
Bruit/pollution atmosphérique

AGENTS



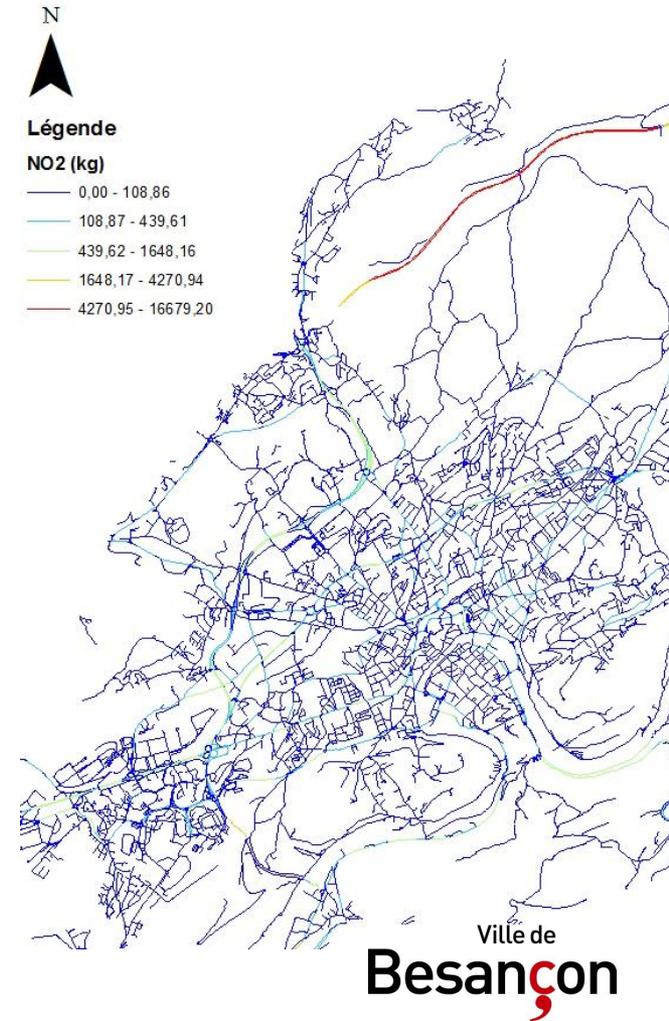
CIBLES

Adultes/enfants



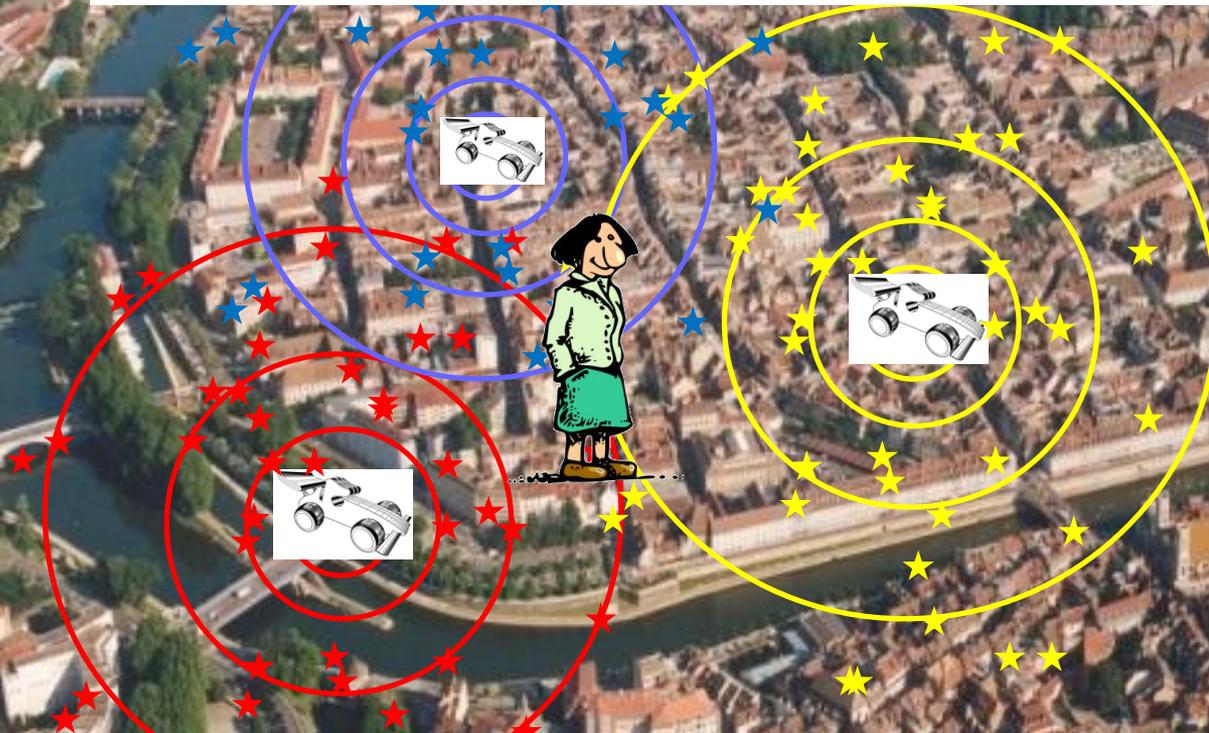
Evaluation/prévention des risques

Le bruit et la pollution de l'air en milieu urbain : approche multi-échelle spatiale et temporelle pour l'étude d'un phénomène de multi-exposition



Problématique

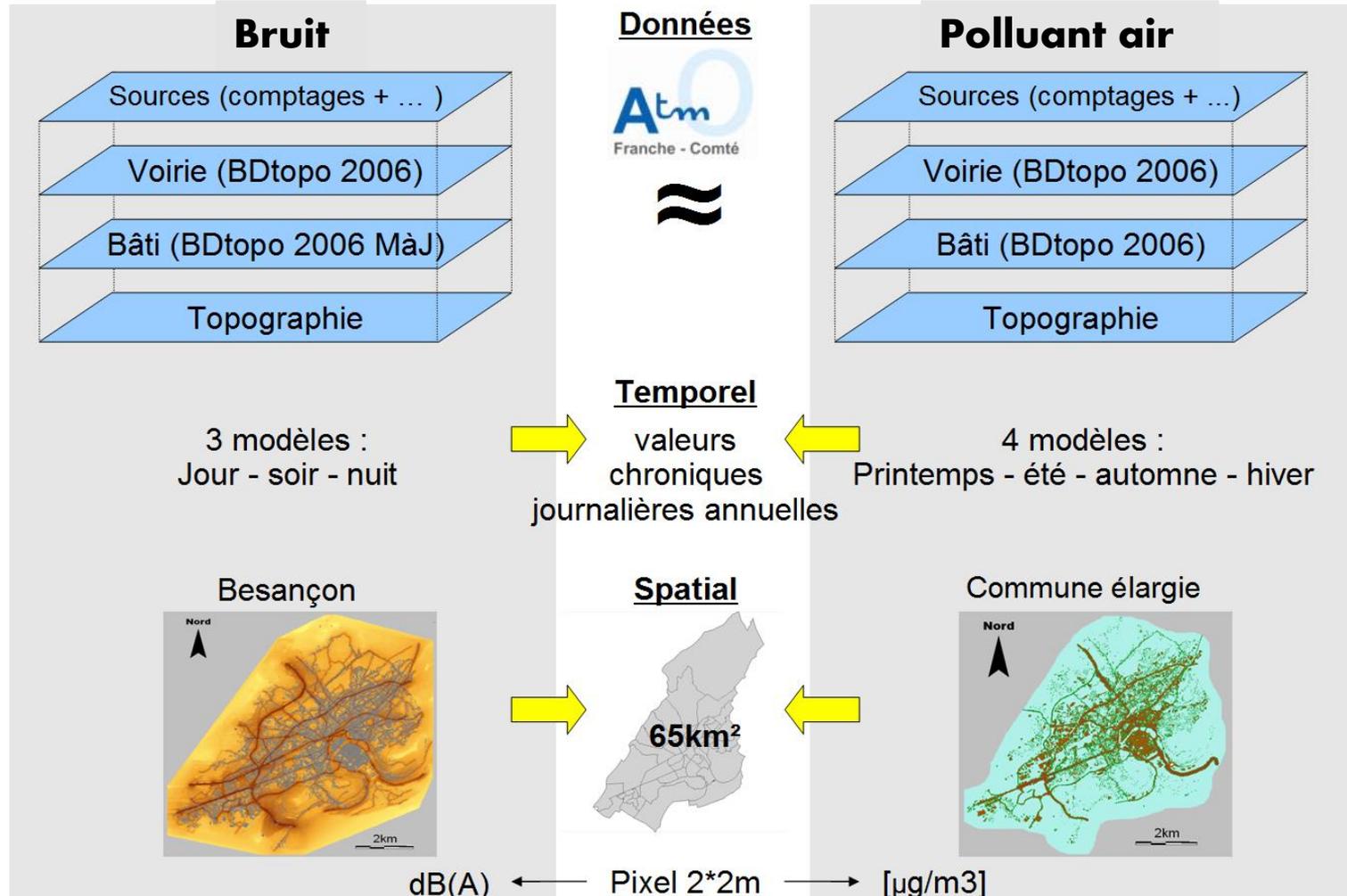
- Peut-on établir des modèles de multi-exposition à l'échelle d'une agglomération (Besançon : 65 km²) ?
- Comment utiliser ces modèles pour évaluer un niveau d'exposition individuelle? Et étudier le lien qualité de l'air - santé.



Approche de multi-exposition : distribution spatiale

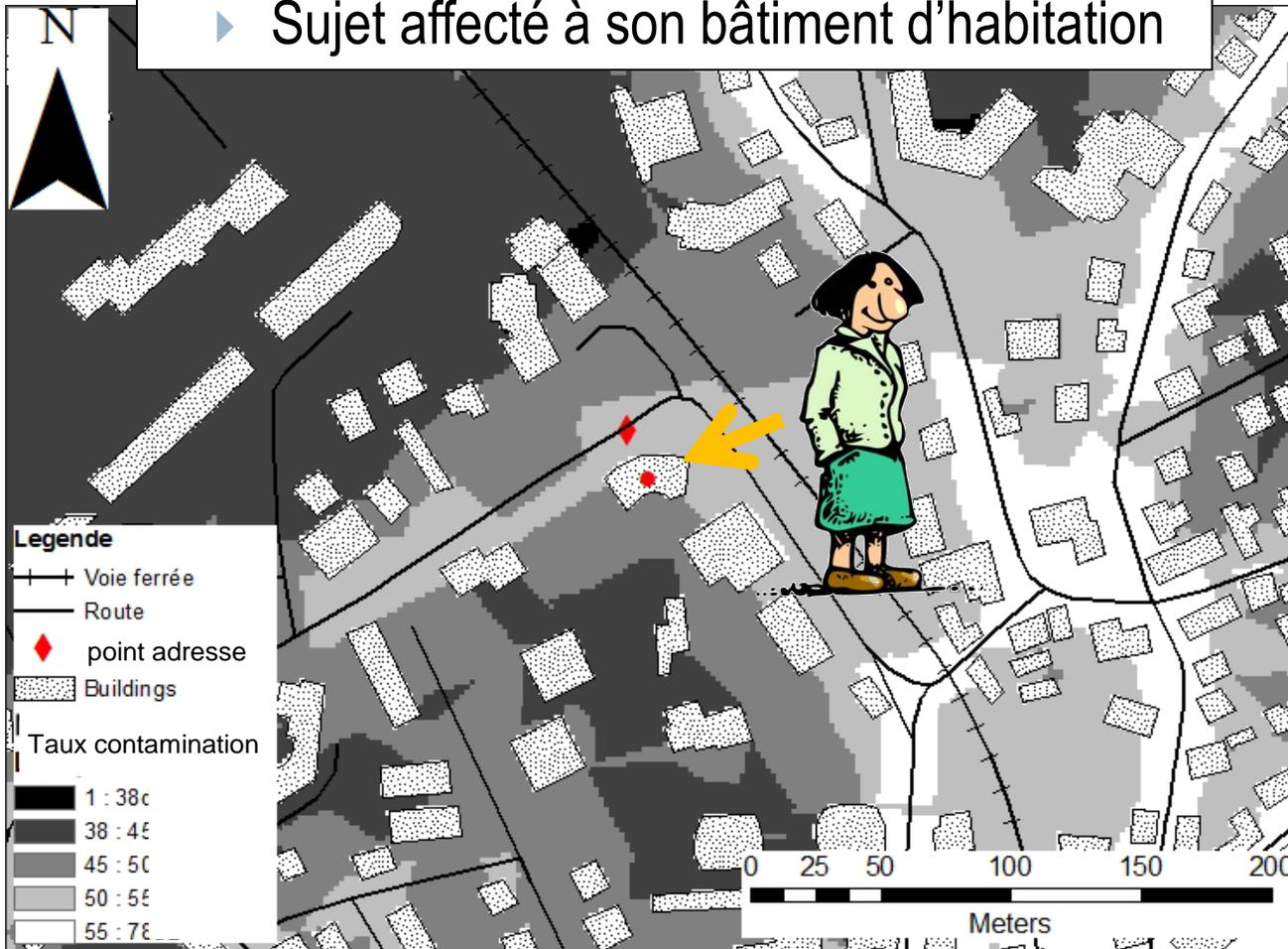
Eléments / questionnements méthodologiques:

- Construction et compatibilité des modèles
- choix de l'échelle/des indices d'observation



Lien entre contamination d'un milieu et exposition individuelle : définir et quantifier l'espace d'exposition

▶ Sujet affecté à son bâtiment d'habitation

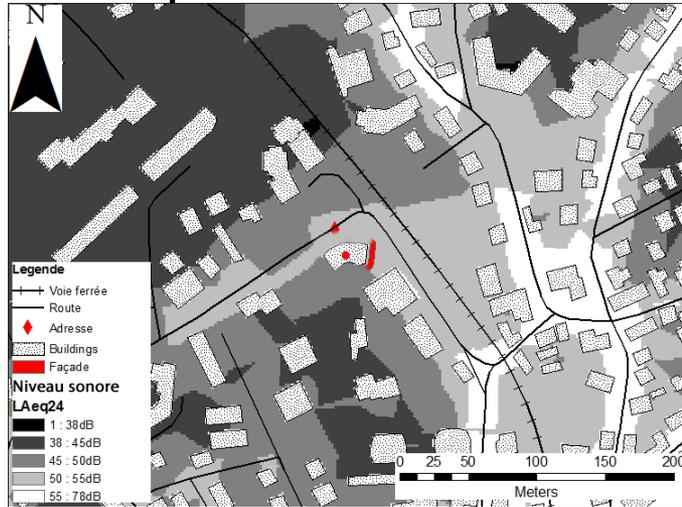


Comment quantifier le niveau de contamination d'un milieu ?

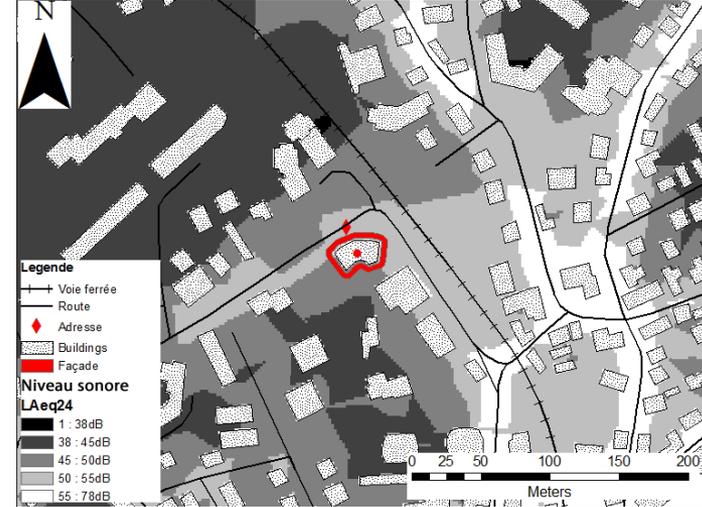
Comment définir et quantifier l'espace d'exposition / niveau d'exposition d'un sujet ?

Quantifier l'exposition - 4 techniques communes

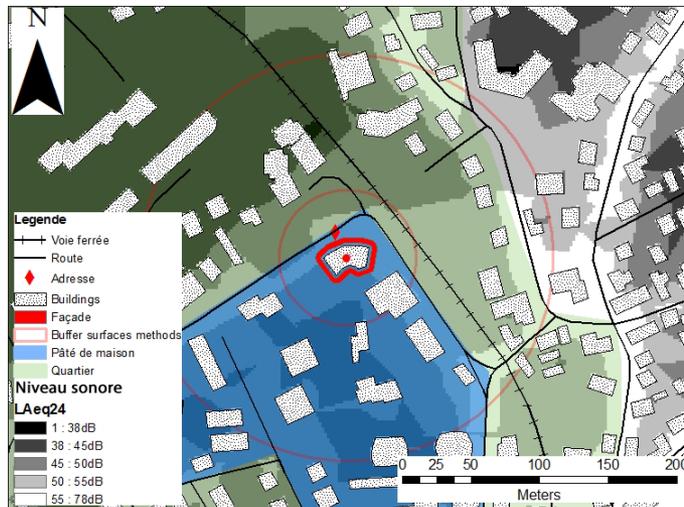
point adresse



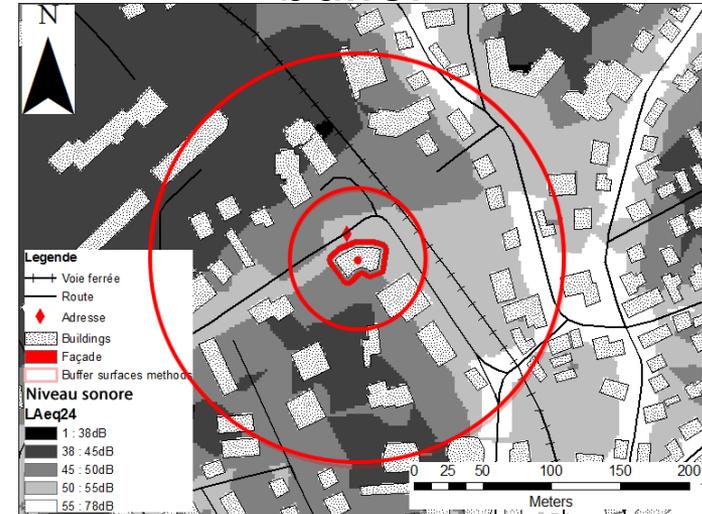
façade du bâtiment



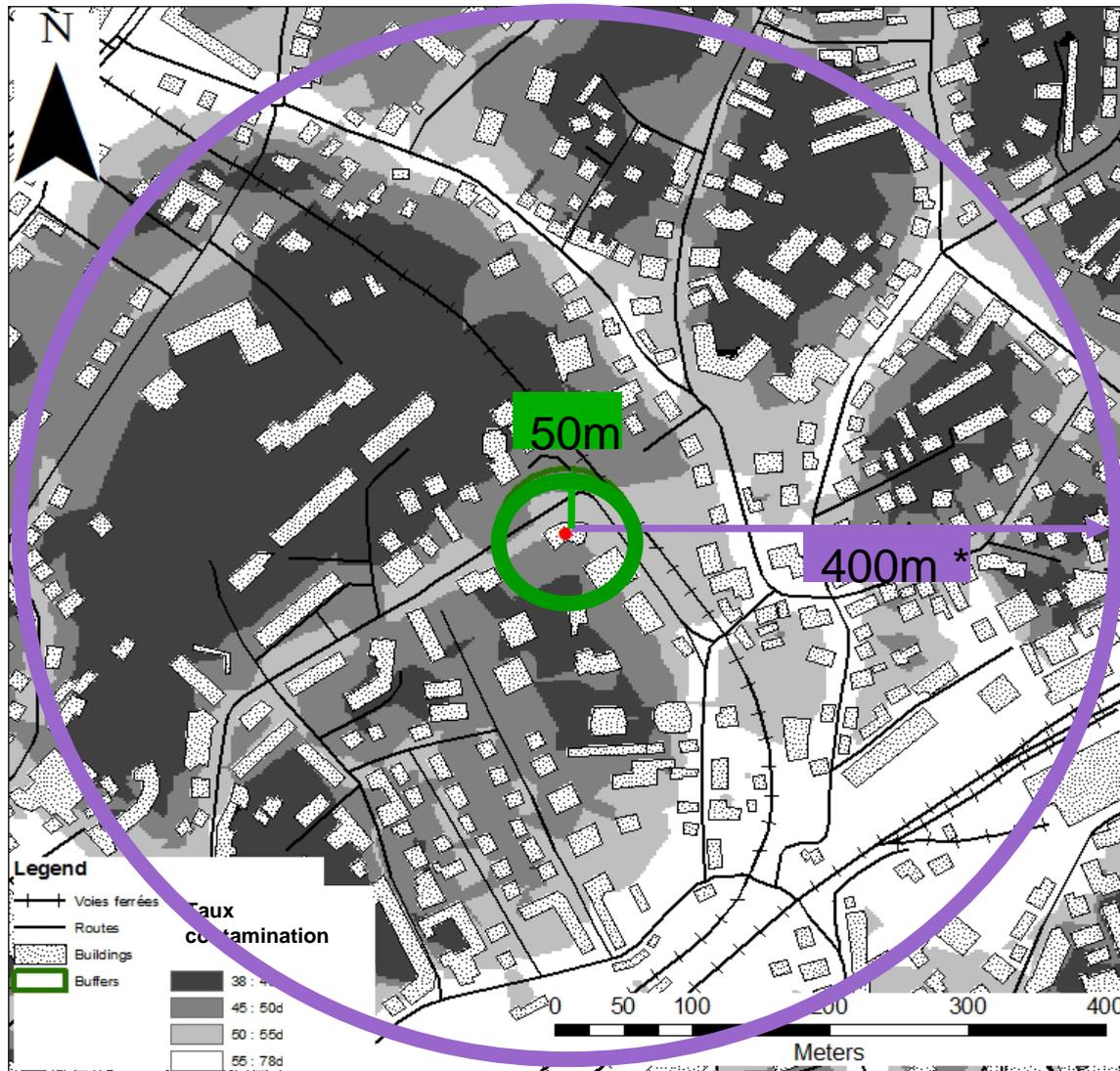
surface administrative



buffer



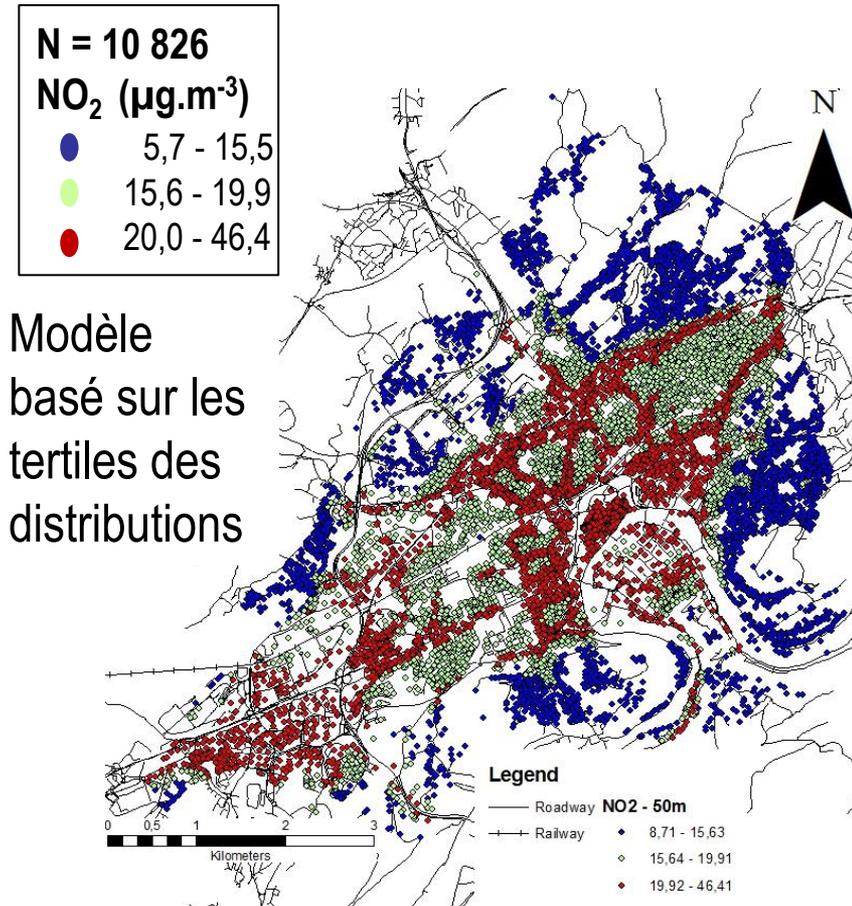
Effet de la taille des buffers : sur les indices NO₂ et bruit



- 50 m = proximité immédiate du bâtiment
- 400 m = taille moyenne de zone de vie pour les populations urbaines européennes selon *Smith et al. (2010)**

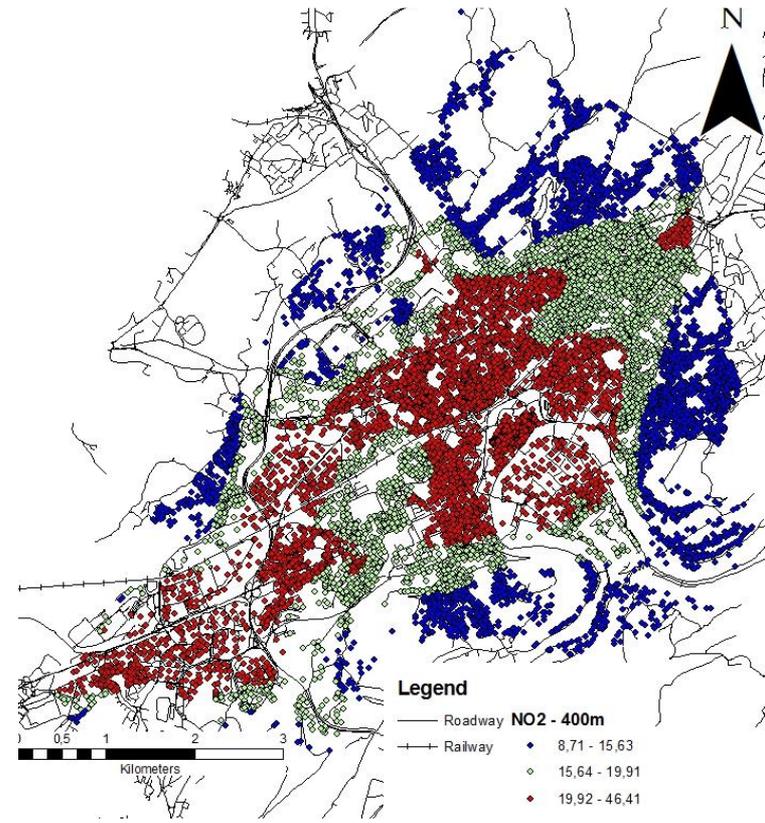
* Smith G. et al., *IJBNPA*, 2010

Modèle de diffusion du NO₂



buffers 50 mètres

→ Signature des axes routiers



buffers 400 mètres

→ Signature dégradée

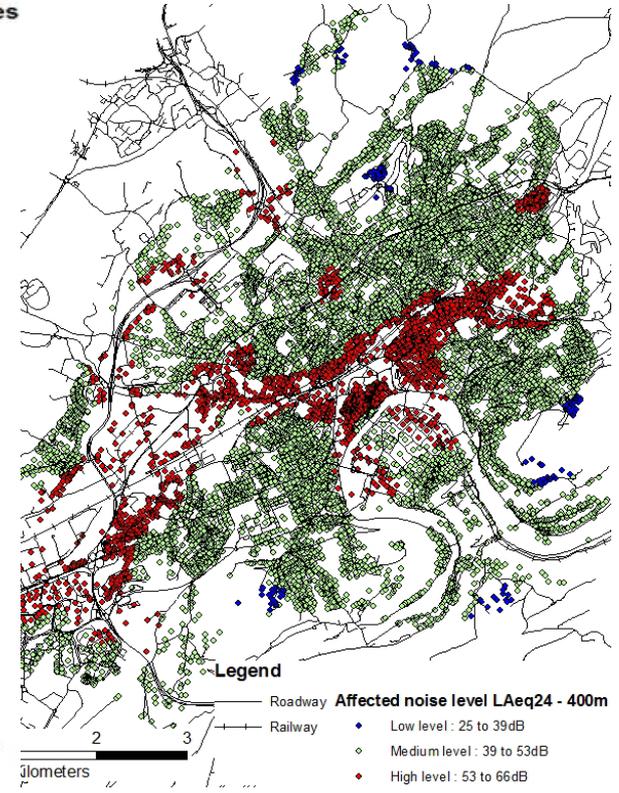
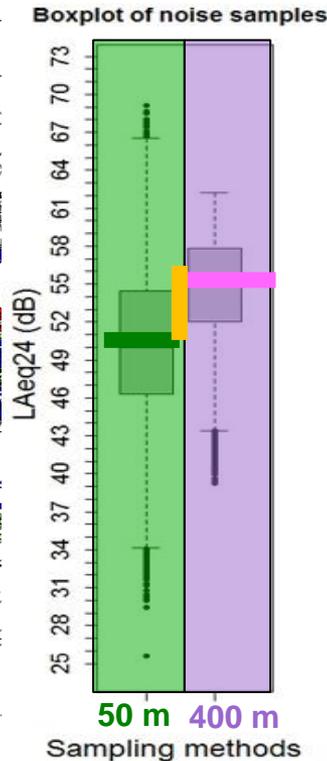
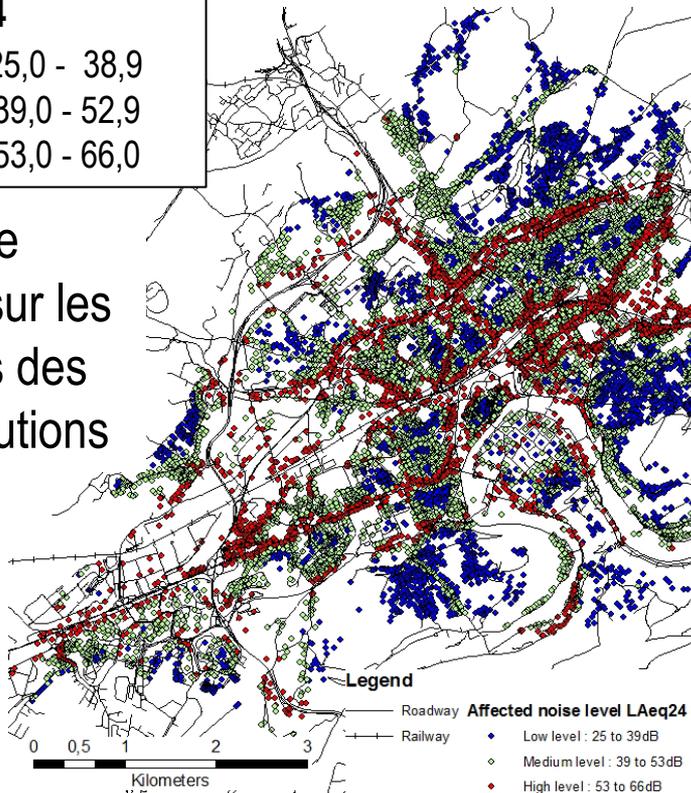
Modèle de diffusion du Bruit

Différence - médianes > 5dB : triplement de la puissance

N = 10 826
Niveau sonore (dB)
LAeq24

- 25,0 - 38,9
- 39,0 - 52,9
- 53,0 - 66,0

Modèle
basé sur les
tertiles des
distributions



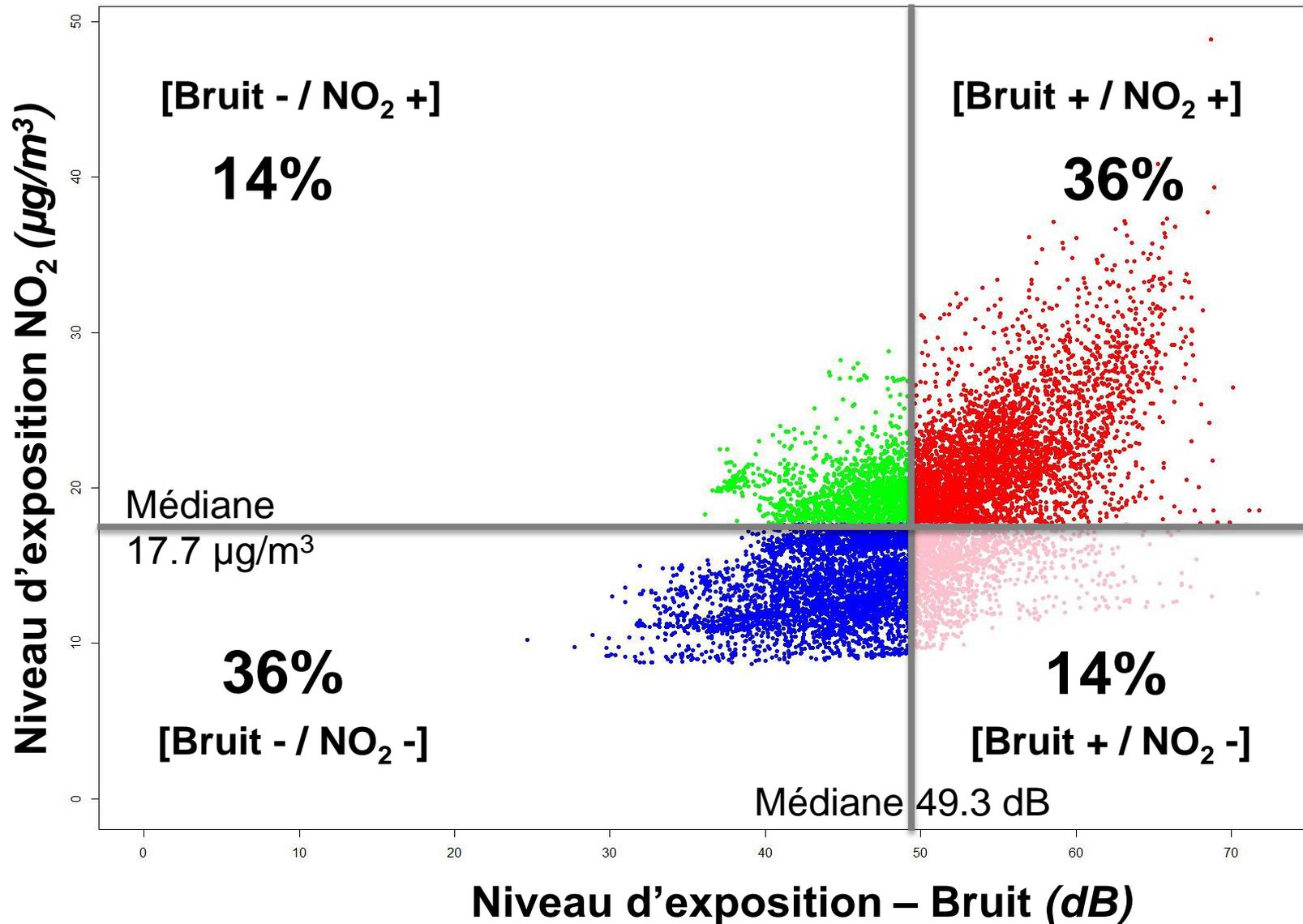
buffers 50 mètres

buffers 400 mètres

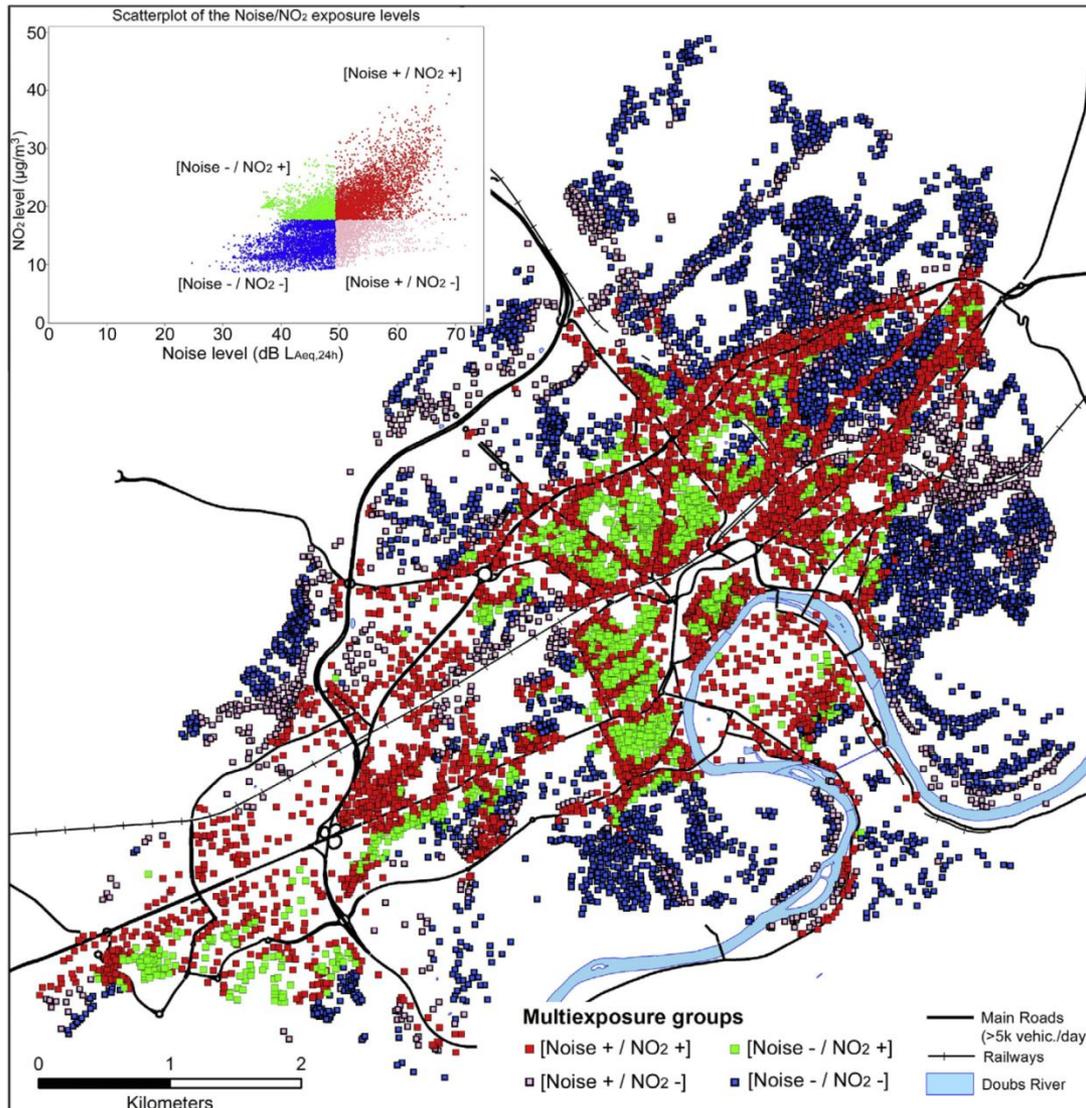
→ Mêmes types de distribution que pour le NO₂

Tenailleau Q. et al.
(2015b) JES

Nuage de points - multi-exposition Bruit /NO₂



Multi-exposition Bruit / NO₂



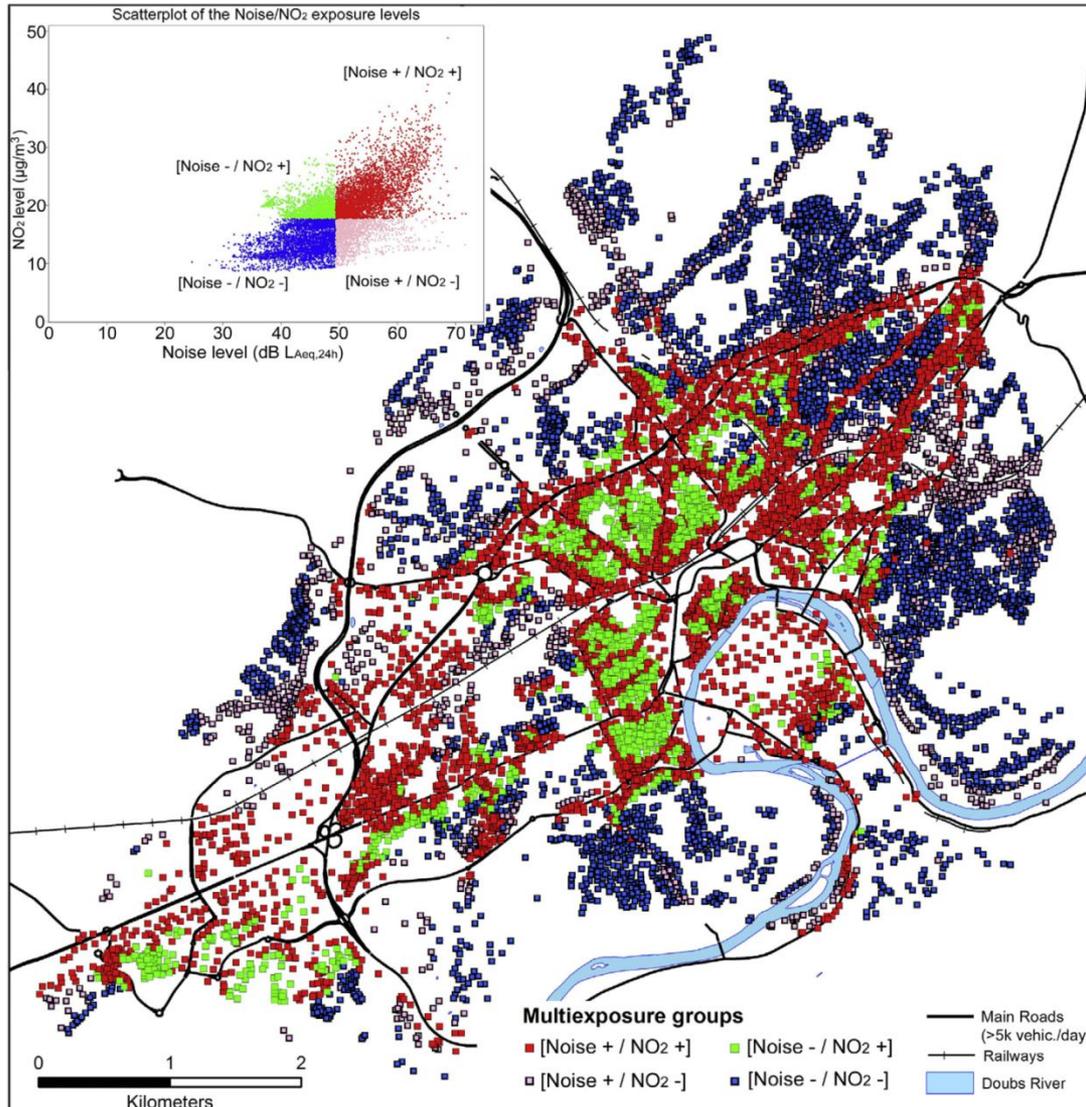
Distribution spatiale

- **[Bruit + / NO₂ +]**
Le long des routes principales Secteur Sud-ouest
- **[Bruit - / NO₂ -]**
Bordure urbaine Secteur Nord-est
- **[Bruit - / NO₂ +]**
A l'intérieur de bloc de ville densément urbanisé
- **[Bruit + / NO₂ -]**
Le long des routes de la bordure urbaine

Distributions des groupes de multi-exposition bruit/NO₂

*Tenailleau Q. et al.
(2016)*

Multi-exposition Bruit / NO₂



Quelle est l'influence de la structure urbaine sur le phénomène de multi-exposition ?

● [Bruit - / NO₂ +]

● [Bruit + / NO₂ -]

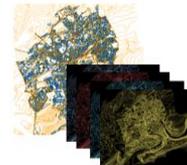
Distributions des groupes de multi-exposition bruit/NO₂

Tenailleau Q. et al. (2016)

Collaborations en cours et perspectives ...

→ Effet chez l'homme et chez l'animal

Prématurité et multi-exposition
environnementale (PrémaBquA)



Données d'exposition environnementale
Bruit/NO₂ via l'adresse du domicile



Données médicales et
socio-démographiques via
le dossier médical informatisé



**4800 accouchements
cas et témoin**



Données socio-économiques
via l'IRIS du domicile



Impact de la pollution atmosphérique et du bruit
sur des traits d'histoire de vie des Mésanges
bleues et charbonnières

Multi-exposition



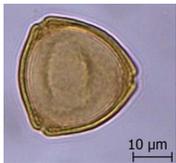
Eléments de météorologie
Pression atmosphérique

AGENTS



CIBLES

Adultes



Evaluation/prévention des risques

Etude EXP-PO

Survenue du pneumothorax spontané et éléments de météorologie Etude multicentrique de type cas-croisé en France



Problématique



Pneumothorax spontané primitif (PSP)
→ rupture de bulles sous pleurales (blebs)
→ Pénétration de l'air dans l'espace pleural
→ PSP : décollement de la plèvre,
affaissement du poumon

Rim T, Bae JS, Yuk YS. Life-Threatening Simultaneous Bilateral Spontaneous Tension Pneumothorax - A case report -. The Korean Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2011;44(3):253.

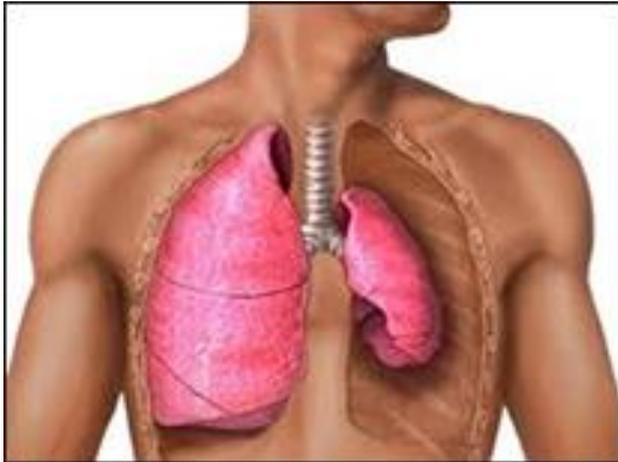


Problématique



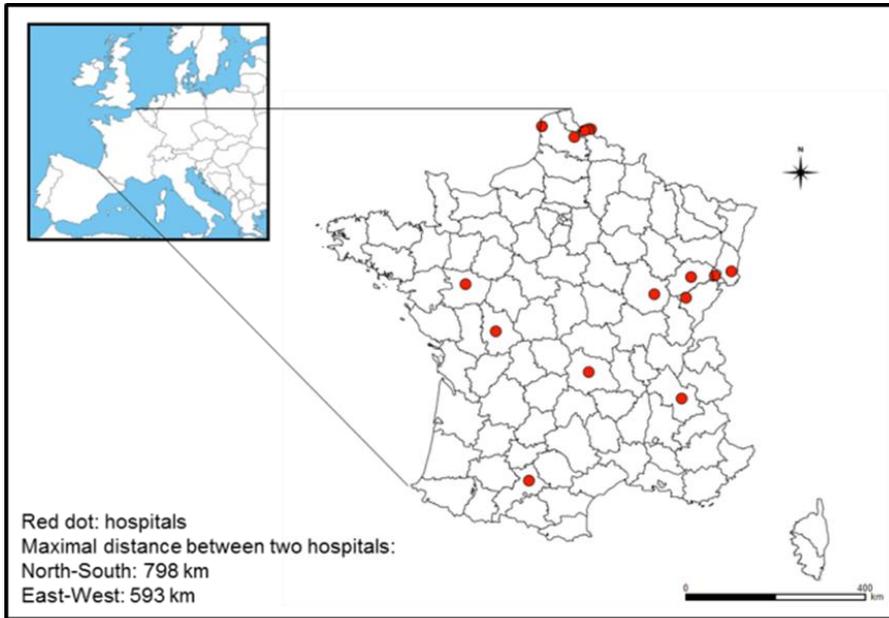
Rim T, Bae JS, Yuk YS. Life-Threatening Simultaneous Bilateral Spontaneous Tension Pneumothorax - A case report - . The Korean Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2011;44(3):253.

Pneumothorax spontané primitif (PSP)
→ rupture de bulles sous pleurales (blebs)
→ Pénétration de l'air dans l'espace pleural
→ PSP : décollement de la plèvre, affaissement du poumon

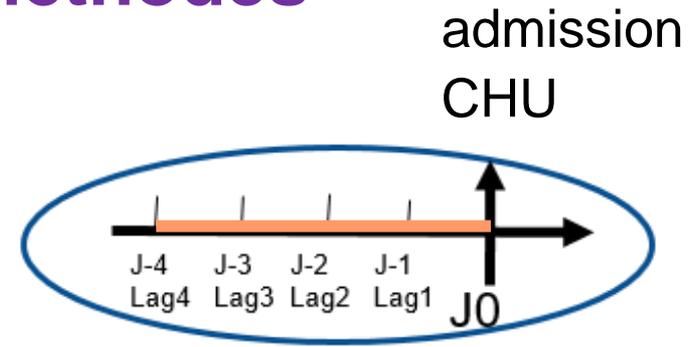


- *Existe-t-il une relation entre la survenue d'un premier épisode de pneumothorax et l'exposition à des variations de pression atmosphérique ?*
- *Si oui, peut-on identifier un éventuel effet seuil et un délai d'induction associés à l'occurrence du PSP?*

Etude multicentrique de type cas/croisée : population et méthodes



14 services d'urgence de CHU
5 années (2009-2013),
3086 admissions PSP, n = 851



période d'exposition de 4 jours

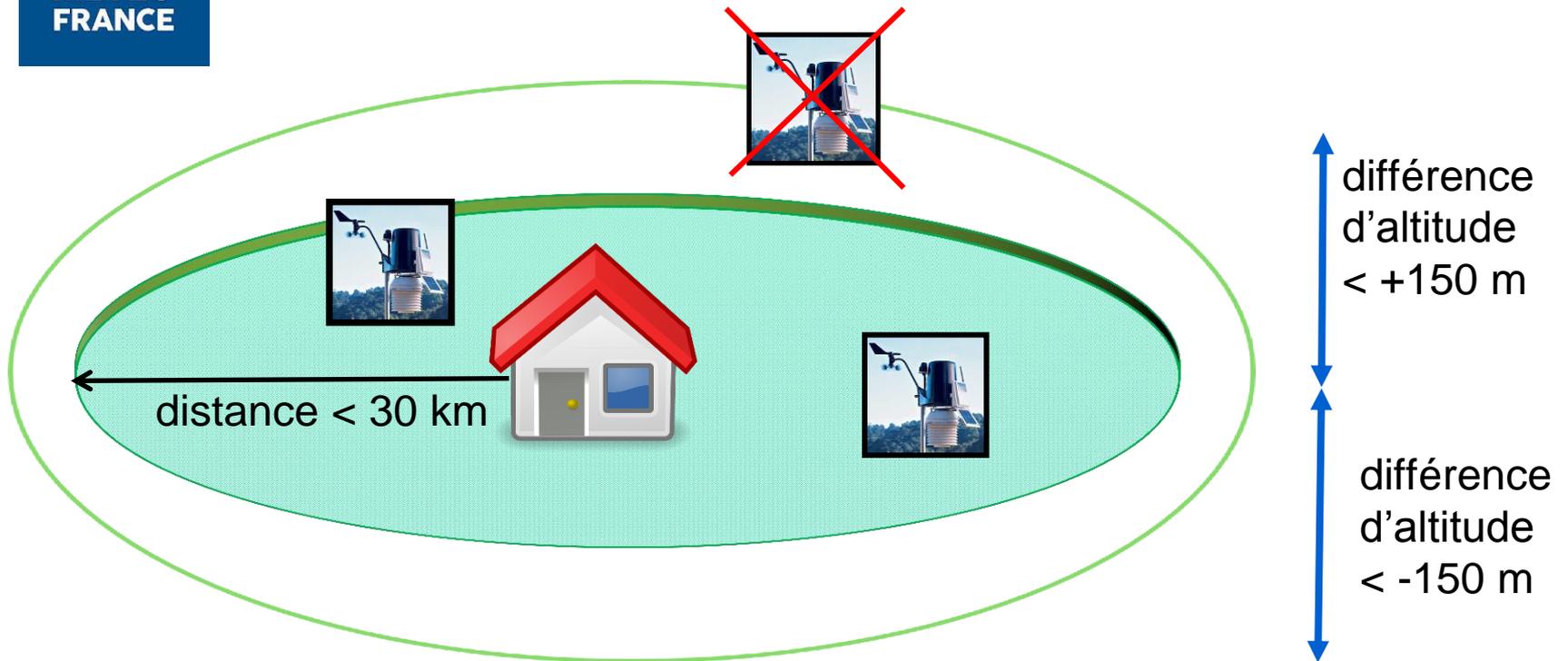
Mesures horaires de pression atmos.
- variations Rapides de Pression Atmosphérique (RPA)
- fenêtre de temps : 3h, 6h, 12h
- seuils d'amplitude : 5, 7, et 10 hPa

Etude multicentrique de type cas/croisée : population et méthodes

Exposition : lieu d'exposition = lieu d'habitation du patient



232 stations mobilisables, 38 stations utilisés



Associations entre les caractéristiques de PA et la survenue du PSP

- période de 4 jours - selon des seuils pour la variation de pression et la fenêtre temporelle.

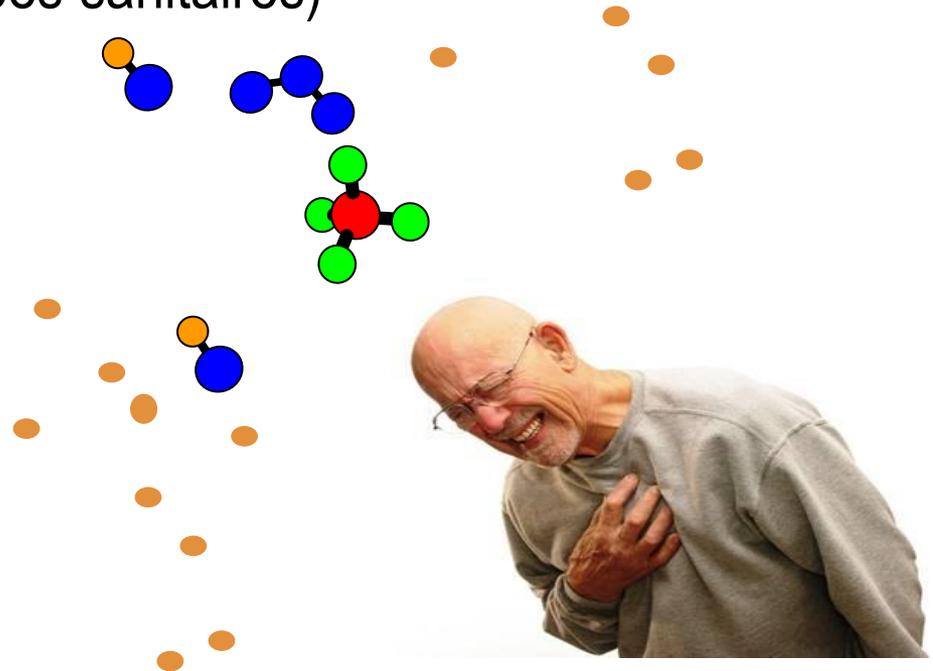
Moyenne de la pression atmos. sur l'ensemble des 4 jours des 5 ans
= $991,2 \pm 19,8$ hPa (situation dépressionnaire)

Résultats soumis pour publication donc
non présentés ici

Collaborations en cours et perspectives ...

→ Survenue du PSP et qualité de l'air

Survenue du Pneumothorax spontané et multi-exposition environnementale (croiser les éléments de météorologie, de qualité de l'air et les données sanitaires)





Merci de votre attention

**Merci aux acteurs issus de
domaines variés participant à
ces études transversales ...**