



LA DENDROCHIMIE

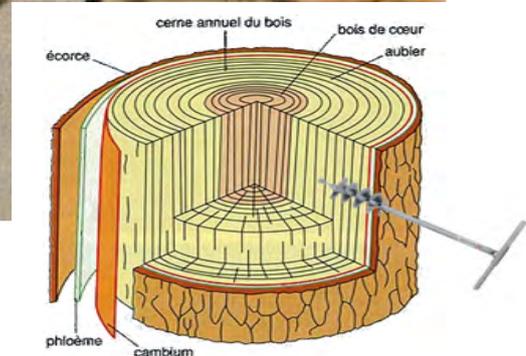
DESCRIPTION THÉORIQUE DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

La dendrochimie est un outil d'aide à la datation de la pollution et à la recherche de responsabilités. La technique repose sur le fait que les végétaux puisent, dans le sol et dans la nappe, les nutriments nécessaires à leur développement. Ils sont ainsi susceptibles de capter certains polluants présents dans les sols ou le sous-sol.

La dendrochimie permet de retracer, via les cernes de bois issus d'une carotte prélevée dans l'arbre, l'histoire d'une pollution ou la vitesse de migration d'un panache. Elle est utilisée en procédure judiciaire essentiellement en Allemagne, Belgique, France et Etats-Unis.



© JC BALOUET



d'après Raphaël Passas, 2008

CONTEXTE D'UTILISATION

La dendrochimie est une technique qui est utilisable sur **des sites présentant des arbres** supposés antérieurs à la pollution. Les arbres peuvent être sur pieds ou déjà coupés car il est possible d'échantillonner une souche, dès lors qu'elle n'est pas dégradée et que la date de la coupe est connue. Les arbres seront plus ou moins de bons indicateurs en fonction de leur essence. Il est également important que des arbres de référence puissent être échantillonnés hors-site et que la pollution soit accessible par le système racinaire.

La **connaissance du type de polluant** avant le début des investigations est essentielle afin d'échantillonner assez de matière et de cibler les espèces les plus pertinentes. A noter que les arbres en bordures d'océan sont peu exploitables pour des pollutions en COHV et en polluants d'origines fossiles.

Cette technique s'utilise **en complément de sondages** : les sondages de sol et piézomètres permettent d'identifier une pollution et ses caractéristiques (extension et profondeur) ; la dendrochimie permet de compléter les investigations en datant la pollution.

Les résultats permettent de retracer à l'année près un épisode de pollution mais ils ne permettent pas de quantifier précisément un polluant. Les limites de détection dans le bois pour la dendrochimie sont de l'ordre du ppm. Elles dépendent du polluant et de la technique d'analyse. La précision spatiale de cette technique sera d'autant plus fine que le nombre d'arbres investigués sera important.

À quelle étape ?

La dendrochimie est essentiellement une technique utilisée pour la caractérisation de pollutions lors du diagnostic. Elle n'est pas utilisée pour le suivi de dépollution ou la surveillance environnementale car les échelles de temps sont de l'ordre de la dizaine d'année ; le phytoscreening lui sera préféré pour ces phases de suivi.

LA DENDROCHIMIE

POLLUANTS CONCERNÉS

Les méthodes d'analyse utilisées par la dendrochimie ne donnent accès qu'aux **polluants élémentaires ou aux éléments traceurs de pollution**, comme le chlore pour les COHV ou le soufre, le vanadium, le nickel, le chlore ou le plomb pour les carburants fossiles.

Les polluants volatils ne sont pas détectables directement en dendrochimie mais des marqueurs sont recherchés (chlore pour les COHV chlorés, plomb pour les essences antérieures aux années 2000, etc.).

Le tableau suivant présente les polluants pour lesquels la dendrochimie est applicable.

Famille de polluants	Composés organiques						Composés inorganiques	
	COHV	Phénol/ chlorophénol	PCB	HCT (n-alcanes)	HAP	BTEX	ETM	Explosifs
Dendrochimie adaptée	Oui (sauf pour le chlorure de vinyle)	Non étudié	Non	Oui (surtout C24-C29)	Oui (pour les composés les moins volatils) (sauf pour les conifères)	Oui	Oui (surtout pour Mn, Pb, V, Ni) Non adapté pour le Cr et le Mo avec EDXRF Non adapté pour l'As et le Hg pour LA/ICPMS	Non étudié
Limite de détection dans le bois	ppm	Non étudié	Ppb à sub-ppb	ppm	ppm	ppm	Ppm 0.001 ppb pour le Hg	Non étudié
Echantillon	Carotte Ø = 1cm	Non étudié	Carotte Ø = 1cm et de plus de 1 g	Carotte Ø = 1cm	Carotte Ø = 1cm	Carotte Ø = 1cm	Carotte Ø = 1cm Carotte Ø = 0,5 cm et de plus de 0.05 g pour le Hg	Non étudié
Préparation et extraction	Lamelle 2 mm	Non étudié	Congélation, broyage, ASE ou Soxhlet	Lamelle 2 mm	Lamelle 2 mm	Lamelle 2 mm	Lamelle 2 mm ou calcination	Non étudié

Les mécanismes qui influencent sur l'assimilation des polluants par les arbres sont :

- la profondeur de la pollution (et donc l'accès racinaire) ;
- l'espèce pour les inorganiques (pas d'influence identifiée pour les organiques) ;

- le climat et la saison via l'évapotranspiration et la précipitation ;
- la rhizodégradation (via les champignons mycorhiziens) ;
- le coefficient de partage octanol-eau (Log Kow) : pour un coefficient faible, l'assimilation augmente avec la teneur en matière organique du sol.

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

Le matériel nécessaire pour l'échantillonnage est spécifique mais simple et facilement transportable : une tarière dite de Pressler permet de réaliser une carotte de 10 mm de diamètre dans l'arbre et une sangle de maintien peut permettre de démarrer plus facilement pour les bois durs (Jim-Gem increment borer). Tous les outils doivent être doublés, voire disposer de pièces de rechange, car l'équipement peut casser.

Pour l'analyse en laboratoire, seuls certains laboratoires spécialisés ont le matériel adapté. La technique d'analyse est à adapter au polluant recherché. La plus courante est la spectrométrie par fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF) qui nécessite la préparation de l'échantillon (séchage

et préparation d'une lame). Cette technique de mesure est très reproductible, avec une variance inférieure à 1%. Pour les très faibles concentrations, les laboratoires utiliseront un spectromètre de masse à plasma à couplage inductif et à ablation laser (LA-ICP-MS).

Pour le mercure, une phase de combustion est également nécessaire après la phase de séchage.

Enfin, un logiciel est ensuite nécessaire pour l'interprétation des données. Par exemple, le logiciel libre Scanchem (INRAE), développé lors du projet PIT, est téléchargeable gratuitement sur internet mais nécessite une certaine expertise pour l'interpréter.



MÉTHODOLOGIE

Les investigations par dendrochimie sont réalisées suivant deux phases distinctes : l'échantillonnage sur le terrain puis la préparation et l'analyse en laboratoire. Une analyse des résultats doit être réalisée par un expert.

Au préalable, il convient de vérifier l'adéquation du site à la dendrochimie (densité d'arbre suffisante sur le tracé supposé du panache et de la source potentielle de pollution, profondeur et direction de la nappe en cohérence avec l'accès du système racinaire à la pollution).

Échantillonnage

L'échantillonnage peut être réalisé à n'importe quelle période de l'année. La première étape consiste à repérer une sélection d'arbres à échantillonner. Dans l'idéal, les arbres choisis pour l'échantillonnage seront de la même espèce, du même âge et de la même taille, en bonne santé et les zones échantillonnées ne devront pas être cicatrisées, infectées ou pourries, ni être dans les zones d'intersection de branche. Une fois les arbres choisis, il est important de collecter le plus d'information à leur sujet (référence, numérotation, mesure du diamètre à hauteur de poitrine, géolocalisation, photographie, ...). Un échantillon témoin, servant de référence, peut également être réalisé hors du site, sur un arbre de la même espèce et non impacté par la pollution. Il permettra de retracer des épisodes de sécheresse ou de gel qui peuvent influencer la croissance de l'arbre.

L'échantillonnage requiert d'être à deux car l'exercice nécessite une certaine force physique. Il convient de prélever les carottes les plus longues possible et non de se limiter à des carottes courtes, faute de capacité physique sur le terrain. Il est réalisé à la tarière à hauteur de poitrine et en excluant l'écorce. Il est également possible d'échantillonner à partir d'un tronçon de bois pour les arbres morts. La tarière est à rincer à l'éthanol entre 2 prélèvements afin de ne pas propager de pathogènes entre les arbres et pas à l'eau de javel, pouvant induire une contamination de la carotte. Celle-ci est manipulée avec des gants ou des tenailles et placée dans un moule en bois, permettant de la maintenir intacte. La plaie de l'arbre est ensuite stérilisée ou rebouchée (avec du mastic ou un extrait d'arbre de la même essence) selon le souhait du propriétaire. Ces prélèvements sont sans danger pour l'arbre échantillonné lorsqu'ils sont réalisés dans les règles de l'art.

Certaines techniques analytiques comme la GCxGC MS pour les PCB nécessitent plus de matière et obligent plusieurs carottages par arbres ou l'utilisation de tarière plus conséquente (12 mm de diamètre).

Préparation et analyse de l'échantillon

Après réception, le laboratoire vérifie l'humidité de la carotte ; un arbre malade ou mort, qui ne sera pas représentatif, présente une humidité inférieure à 40 %.

Pour l'analyse des traceurs des COHV, des BTEX et des ETM, la préparation de l'échantillon par le laboratoire consiste à un séchage puis un ponçage et un polissage des carottes et la découpe d'une lamelle de 2 mm d'épaisseur à la scie le long de la carotte. La lamelle est analysée par EDXRF par scan linéaire (6 000 points de mesure sur une carotte de 30 cm).

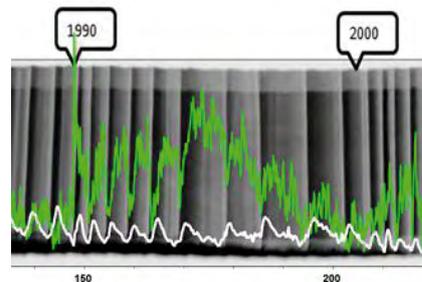
Pour l'analyse des PCB et du mercure, la carotte est segmentée et les cernes sont analysés individuellement après calcination (Hg) ou congélation (PCB).

Interprétation

L'interprétation des résultats d'analyse est réalisée par un expert qui saura gérer le traitement d'une grande quantité de données.

Le résultat obtenu est une donnée semi-quantitative : la teneur obtenue dans l'arbre ne correspond pas à la teneur présente dans les sols ou la nappe. Par contre, la datation de la pollution obtenue est précise à l'année près.

La dendrochimie peut distinguer l'arrivée brutale d'une pollution ou la migration progressive d'un panache notamment lorsque plusieurs arbres peuvent être échantillonnés le long d'un gradient hydraulique.



Analyse via EDXRF dans le cas d'une pollution aux solvants chlorés (PIT 2015).

Points de vigilance dans l'interprétation

- L'absence de pollution dans les cernes ne permet pas de conclure à l'absence de pollution des sols et des eaux souterraines (faux-négatifs notamment dans le cas de la présence de plusieurs nappes superposées).
- Certains polluants (HAP, toluène) sont présents naturellement dans les arbres et peuvent conduire à des faux-positifs si cette donnée n'est pas prise en compte.
- Les anomalies détectées sont souvent suivies par une diminution dans les cernes suivants malgré la présence continue du polluant. Ce phénomène peut être attribué à un mécanisme de compensation de l'arbre.
- Le salage des routes peut induire un marquage au chlore des cernes. L'échantillonnage d'un arbre de référence exposé aux mêmes conditions d'usage du terrain (actuel et passé) est donc très important.



AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Echantillonnage

- Mise en place rapide,
- Investigation possible dans des zones difficiles d'accès (milieu urbain ou industriel, présence de nombreux réseaux enterrés compliquant la réalisation de sondages),
- Réalisable par du personnel débutant,
- Prélèvement peu coûteux,
- Peu d'équipement nécessaire,
- Peu d'effets environnementaux par rapport aux méthodes de prélèvement conventionnelles (pas d'effet sur l'arbre échantillonné, bilan carbone, etc).

Polluant

- Datation de la pollution et historique des épisodes de pollution,
- Utilisable avec des polluants, organiques et inorganiques, présentant des marqueurs caractéristiques,
- Permet de différencier des pollutions asynchrones.

INCONVÉNIENTS

Echantillonnage

- Nécessite de vieux arbres.

Polluant

- Nécessité de connaître les pollutions recherchées et leurs marqueurs,
- Nécessité de la maturité de l'arbre lorsque la pollution arrive à l'arbre,
- Artefacts possibles (salage des routes, embruns océaniques).

Laboratoires, matériel d'analyse

- Analyse par EDXRF non développée pour la dendrochimie actuellement en France,
- Nécessite des méthodes analytiques avec une très faible limite de détection.
- Coût d'analyse élevé actuellement

Influence sur les résultats et incertitudes

- Possibilité de translocation radiale entre les cernes de croissance pour certains polluants,
- Délais d'absorption des polluants par les arbres (dû au temps de migration du polluant de la source aux racines),
- Influence du site (profondeur de la pollution, vitesse de propagation du panache, influence des couches imperméables).

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



R&D aboutie, indicateurs développés, technique utilisée sur le terrain

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La phase d'échantillonnage sur site est très rapide, l'obtention d'une carotte est réalisée en moins d'une heure (réalisation jusqu'à 10 carottes par jour). Par contre, les délais d'analyse sont relativement longs ; il faut compter environ

20 heures de comptage pour l'analyse EDXRD d'une carotte de 30 cm de long et une demi-journée de traitement des données par un expert. Le faible nombre de laboratoires réalisant les analyses peut ajouter une contrainte temporelle.

PHASE

PRÉLÈVEMENT

ANALYSE

TRAITEMENT

Délai associé



⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Les coûts de l'échantillonnage sur le terrain sont faibles ; ils correspondent au coût de deux opérateurs sur site. L'acquisition du matériel de prélèvement a un prix compris entre 150 et 1000 € selon le modèle choisi (jusqu'à 800 € pour une tarière de 50 cm de long et de 12 mm de diamètre).

Le coût d'une analyse en laboratoire est de 1500 € par carotte pour la préparation, l'envoi, l'analyse, la vérification de la qualité et le rapport analytique. À ces coûts s'ajoute le prix de traitement des résultats obtenus par un expert.

PHASE

PRÉLÈVEMENT

ANALYSE

TRAITEMENT

Coût associé



€ < 100 € / €€ < 1000 € / €€€ > 1000 €

POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] *Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués*, Avril 2017

[2] *Guide méthodologique Ademe - Pollution investigation by trees (PIT)*, Aout 2015

[3] *Présentation PIT aux Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués - 18 et 19 novembre 2014*

[4] *Présentation à la journée technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sites et sols pollués du 07 novembre 2019*