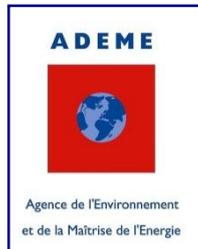




METOTRASS : Méthodologie optimisée pour l'évaluation des teneurs en éléments traces (As, Pb, Cu, Zn) dans les sols en domaine de socle : test sur le département de la Loire-Atlantique



METOTRASS : Méthodologie optimisée pour l'évaluation des teneurs en éléments traces (As, Pb, Cu, Zn) dans les sols en domaine de socle : test sur le département de la Loire-Atlantique

Rapport final

BRGM/RP-63998-FR
Mai 2013

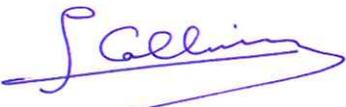
Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM POLE07

C. Le Guern, V. Baudouin, P. Conil, B. Courtais, M. Houel avec la collaboration de A. Coffinet, C. Latourte et F. Gourmelen

Vérificateur :

Nom : L. CALLIER

Date :



Approbateur :

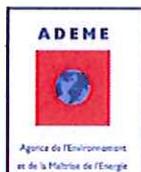
Nom : B. CLOZEL

Date :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

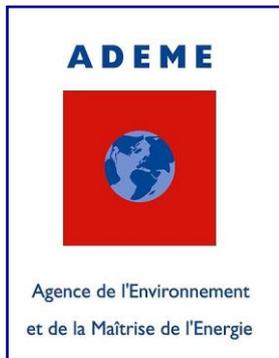


Mots clés : Eléments trace, arsenic, plomb, cuivre, zinc, sol, fond géochimique, stratégie, échantillonnage, analyse, fluorescence X, socle, Massif armoricain, Pays de la Loire, Loire-Atlantique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Le Guern C., V. Baudouin, P. Conil, B. Courtais, M. Houel avec la collaboration de A. Coffinet, C. Latourte et F. Gourmelen (2013) METOTRASS : méthodologie optimisée pour l'évaluation des teneurs en éléments traces (As, Pb, Cu, Zn) dans les sols en domaine de socle – Test sur le département de la Loire-Atlantique, Rapport BRGM/RP-63998-FR, 112 p., 44 ill., 15 tab., 8 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.



METOTRASS

METHODOLOGIE OPTIMISEE POUR L'EVALUATION DES TENEURS EN ELEMENTS TRACES (As, Pb, Cu, Zn) DANS LES SOLS EN DOMAINE DE SOCLE : TEST SUR LE DEPARTEMENT DE LA LOIRE-ATLANTIQUE

Rapport final

Mai 2013

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME
par C. Le Guern, V. Baudouin, P. Conil, B. Courtais, M. Houel avec la collaboration de A. Coffinet,
C. Latourte et F. Gourmelen (BRGM)

Coordination technique :
Hélène Roussel, Service Friches Urbaines et Sites Pollués - Direction Villes et Territoires Durables-
ADEME (Angers)

Remerciements :

Nous tenons particulièrement à remercier Bruno Lemière et Denis Thiéblemont (BRGM) pour les discussions fructueuses ainsi que Blandine Clozel et Lucien Callier (BRGM) pour les remarques constructives apportées lors de la relecture du rapport.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ADEME.fr

Avertissement

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Sommaire

SOMMAIRE	1
LISTE DES ILLUSTRATIONS	3
LISTE DES TABLEAUX	4
RESUME	6
INTRODUCTION	7
I - ORIGINE DES ELEMENTS TRACES DANS LES SOLS DE LOIRE-ATLANTIQUE	9
I.1 - ORIGINE DES ELEMENTS TRACES DANS LES SOLS.....	9
I.2 - ORIGINE NATURELLE EN LOIRE-ATLANTIQUE	9
I.2.1 - Contexte géologique.....	9
I.2.2 - Formations géologiques porteuses d'éléments traces	10
I.2.3 - Concessions minières, gîtes et indices miniers de Loire-Atlantique	13
I.3 - ORIGINE ANTHROPIQUE EN LOIRE-ATLANTIQUE	14
I.3.1 - Occupation des sols	14
I.3.2 - Sites industriels, activités de service	16
I.3.3 - Transports (réseau routier, autoroutes).....	16
II - DONNEES DE GEOCHIMIE DES SOLS EN LOIRE-ATLANTIQUE	18
II.1 - FOREGS	18
II.2 - DONNEES DE LA SOCIETE LOIRE 21	20
II.3 - ASPITET, INRA	20
II.4 - RMQS, INRA	21
II.5 - BDETM-ANADEME, ADEME, INRA.....	22
II.6 - INVENTAIRE MINIER NATIONAL (IMN), BRGM	22
II.7 - DONNEES SNEAP, ELF AQUITAINE	23
II.8 - DONNEES BRGM-DDASS.....	24
III - STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	27
III.1 - TRI DES DONNEES DE L'INVENTAIRE MINIER NATIONAL	27
III.2 - DEFINITION DES CLASSES D'ANOMALIES	29
III.3 - ANALYSE STATISTIQUE	31
III.4 - REGROUPEMENTS LITHOLOGIQUES	31
III.5 - CLASSES D'HETEROGENEITE	35
III.6 - DENSITE DE POINTS PAR OBJET GEOLOGIQUE	38
III.7 - POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURES.....	39
III.8 - POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURES COMPLEMENTAIRES	43
IV - CAMPAGNES DE PRELEVEMENT ET D'ANALYSE	43
IV.1 - PROTOCOLES.....	43
IV.1.1 - Echantillonnage.....	43
IV.1.2 - Préparation des échantillons.....	43
IV.1.3 - Analyses.....	44
IV.2 - GESTION DES DONNEES	45
IV.3 - DIFFICULTES RENCONTREES	45
V - RESULTATS ET INTERPRETATION	47
V.1 - DONNEES BRUTES	47
V.1.1 - Approche statistique.....	47
V.1.2 - Distribution spatiale	50
V.1.3 - Comparaison de l'hétérogénéité constatée par rapport à l'hétérogénéité estimée a priori	54
V.2 - CROISEMENT DES DONNEES D'ANALYSE AVEC LES OBJETS GEOLOGIQUES DEFINIS POUR LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	55
V.2.1 - Teneurs moyennes en éléments traces des objets géologiques sélectionnés.....	55
V.2.2 - Proportion d'anomalies en éléments traces des objets géologiques sélectionnés	58
V.2.3 - Apport des données acquises	62
CONCLUSION	63

BIBLIOGRAPHIE	66
SITES INTERNET	68
ANNEXES	70
ANNEXE 1 - GENERALITES SUR LES SOLS	71
ANNEXE 2 – HISTOIRE GEOLOGIQUE DE LA LOIRE-ATLANTIQUE	75
ANNEXE 3 – SUPERFICIE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES DE LOIRE-ATLANTIQUE PAR REGROUPEMENT LITHOLOGIQUE	79
ANNEXE 4 – LISTE DES POLLUTIONS POTENTIELLES EN ARSENIC, CUIVRE, PLOMB ET ZINC DANS LES SOLS EN BORDURE D’EXPLOITATION MINIERE SUR LE TERRITOIRE METROPOLITAIN	80
ANNEXE 5 – GISEMENT, GITES ET INDICES DE MINERALISATION A L’ARSENIC, AU CUIVRE, AU PLOMB ET AU ZINC EN LOIRE-ATLANTIQUE	71
ANNEXE 6 – COMPARAISON DE L’EXTENSION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ALLOCHTONES ENTRE LES CARTES GEOLOGIQUES (1/50 000) ET PEDOLOGIQUE (1/250 000) DE LOIRE-ATLANTIQUE	85
ANNEXE 7 – PLANCHE CARTOGRAPHIQUE PRESENTANT LES TENEURS MOYENNES EN ELEMENTS TRACES PAR OBJET GEOLOGIQUE ETUDIE, AINSI QUE LES PROPORTIONS D’ANOMALIES FORTE ET TRES FORTE	105
ANNEXE 8 – PLANCHE CARTOGRAPHIQUE PRESENTANT UNE COMPARAISON DES PROPORTIONS D’ANOMALIES FORTE A TRES FORTE CONSTATEES DANS LES OBJETS GEOLOGIQUES ETUDIES EN FONCTION DES JEUX DE DONNEES UTILISES	108

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 : Schéma géologique de la Loire-Atlantique (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchenec, 2007)</i>	11
<i>Illustration 2 : Cartographie des concessions minières et des gîtes et indices miniers</i>	13
<i>Illustration 3 : Carte d'occupation des sols de Loire-Atlantique (données BD Carto IGN, 2010).</i>	15
<i>Illustration 4 : Cartographies des résultats de la campagne FOREGS en arsenic, cuivre, plomb et zinc. (http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas)</i>	19
<i>Illustration 5: Carte de répartition des données d'analyses d'éléments traces métalliques mises à disposition par Loire 21 en 2005 sur le département de la Loire-Atlantique (fond de carte BD Carto, IGN)</i>	20
<i>Illustration 6 : Maillage servant au prélèvements d'échantillons de sols pour le RMQS</i>	21
<i>Illustration 7 : Localisation des différentes campagnes de prospections IMN et SNEAP.</i> ..	22
<i>Illustration 8 : Statistiques (moyenne arithmétique, min, max) par type de formation géologique des teneurs en As dans les échantillons prélevés et analysés lors de l'étude 2006 (Le Guern et al., 2007)</i>	25
<i>Illustration 9 : Statistiques (moyenne arithmétique, min, max) par type de formation géologique des teneurs en Pb dans les échantillons prélevés et analysés lors de l'étude 2006 (Le Guern et al., 2007)</i>	26
<i>Illustration 10 : Exemple de pollution d'origine industrielle</i>	28
<i>Illustration 11 : Exemple de pollution diffuse, le cas des exploitations minières</i>	28
<i>Illustration 12 : Exemple de pollution d'origine viticole</i>	29
<i>Illustration 13 : Carte des 36 objets géologiques de superficie supérieure à 20 km² retenus pour l'échantillonnage</i>	34
<i>Illustration 14 : Cartographie de l'hétérogénéité géochimique probable des sols de Loire-Atlantique en arsenic, cuivre, plomb et zinc.</i>	37
<i>Illustration 15 : Echantillonnage systématique stratifié en plan</i>	40
<i>Illustration 16 : Schéma de répartition des mailles d'échantillonnage.</i>	40
<i>Illustration 17 : Exemple de positionnement de points de prélèvement, lithologies gréseuses de l'Unité du bassin d'Ancenis t4.</i>	41
<i>Illustration 18 : Positionnement des 314 prélèvements de sols envisagés.</i>	42
<i>Illustration 19 – Positionnement des points de prélèvement complémentaires</i>	43
<i>Illustration 20 – Synthèse des étapes de préparation des échantillons</i>	44
<i>Illustration 21 – Corrélation entre les analyses au NITON et les analyses par ICP-AES ou MS</i>	45
<i>Illustration 22 : Distribution des teneurs en As, Pb, Zn, Cu mesurées dans les sols développés sur roche de socle, prélevés dans le département de la Loire-Atlantique dans le cadre du programme METOTRASS (LQ : limite de quantification)</i>	48
<i>Illustration 23 : Distribution des teneurs en As, Pb, Zn, Cu mesurées dans les sols développés sur roche de socle, prélevés dans le département de la Loire-Atlantique</i>	49
<i>Illustration 24 : Teneurs en As des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	50
<i>Illustration 25 : Teneurs en Pb des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	51
<i>Illustration 26 : Teneurs en Zn des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	51

<i>Illustration 27 : Teneurs en Cu des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte).....</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 28 : Teneurs en As des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 29 : Teneurs en Pb des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 30 : Teneurs en Zn des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 31 : Teneurs en Cu des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>54</i>
<i>Illustration 32 : Histogramme de répartition des teneurs en As des échantillons de sols prélevés au droit de l'objet géologique 6 correspondant aux leucogranites et pegmatites.</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 33 : Teneur moyenne en As (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>56</i>
<i>Illustration 34 : Teneur moyenne en Pb (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>56</i>
<i>Illustration 35 : Teneur moyenne en Zn (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>57</i>
<i>Illustration 36 : Teneur moyenne en Cu (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)</i>	<i>57</i>
<i>Illustration 37 : Proportion d'anomalie forte (en haut) ou très forte (en bas) en As (mg/kg) des objets géologiques étudiés.....</i>	<i>59</i>
<i>Illustration 38 : Proportion d'anomalie forte (en haut) ou très forte (en bas) en Pb (mg/kg) des objets géologiques étudiés.....</i>	<i>60</i>
<i>Illustration 39 : Proportion d'anomalie forte (pointillé orange) ou très forte (pointillé rouge) en Cu (mg/kg) des objets géologiques étudiés</i>	<i>61</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Bilan bibliographique des formations géologiques des massifs hercyniens français (hors massif armoricain) où des anomalies en As, Cu, Pb et Zn sont observées (données issues de Sonney et al., 2005).....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2 : Tableau présentant les superficies des différents types d'occupation des sols de Loire-Atlantique (données BD Carto IGN, 2010).....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3 : Liste des 10 principaux polluants constatés (seul ou en mélange) dans les sols ou dans les eaux de nappes d'eaux souterraines à proximité de sites industriels (http://basol.ecologie.gouv.fr, avril 2010)</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4 : Estimation des émissions polluantes (en g/km/an) sur une 2x2 voies à forte circulation (Pagotto, 1999).....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5 : Limites de détection des différentes campagnes IMN</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 6 : Classes de concentrations (mg/kg) en arsenic et plomb (modifié d'après Le Guern et al., 2007)</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 7 : Classes de concentration (mg/kg) en cuivre et zinc proposées.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 8 : Gammes de valeurs en ppm dites ordinaires ou anormales (modifié d'après Baize, 2000, 2004 et Baize et al., 2008).....</i>	<i>30</i>

<i>Tableau 9 : Valeurs limites réglementaires en éléments traces métalliques dans les sols agricoles avant épandages des boues issues du traitement des eaux usées (arrêté du 8 janvier 1998).....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 10 : Regroupements lithologiques et codification associée.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 11 : Codification des unités géologiques décrites par Béchenec (2007).....</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 12 : Détermination des notes d'hétérogénéité par élément à partir des données de l'IMN.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 13 : Détermination des mailles de prélèvement par objet géologique en fonction des classes d'hétérogénéité.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 14 : Nombre prévisionnel de points de prélèvement calculé par objet géologique sélectionné (identifié par son code).</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 15 : Classes d'anomalie pour les teneurs en éléments traces (mg/kg) dans les sols (s'appuyant sur les résultats de Baize, 2000, 2004, 2008)</i>	<i>47</i>

Résumé

Dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires et environnementaux, il est important d'avoir une idée des teneurs présentes naturellement (ou de manière générique) dans les sols. Cet état de référence peut servir par exemple dans la gestion des sites et sols pollués, dans le cadre de l'épandage de boues de station d'épuration sur des sols agricoles, ou dans les cas d'appréciations des risques sanitaires (plombémie par exemple). Le projet METOTRASS a été initié en partenariat avec l'ARS des Pays de la Loire qui se pose des questions sur l'origine de l'arsenic et du plomb dans le département, et avec l'ADEME qui souhaite développer un référentiel de fond géochimique (dont As, Pb, Cu et Zn) dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués et des plans d'épandage de boues de station d'épuration.

La présence d'éléments traces dans les sols et les eaux peut avoir une origine naturelle (fond géochimique), en lien avec la composition des roches mères à l'origine des sols. A l'échelle du territoire métropolitain français, il existe des données de géochimie des sols, mais il est difficile de faire la part entre les origines naturelles ou anthropiques des éléments traces. Parmi les données disponibles, certaines sont acquises avec une approche à maille régulière de grande taille. Compte-tenu de la complexité de l'hétérogénéité lithologique et spatiale de la géologie, notamment en domaine de socle, cette approche n'apparaît pas adaptée. Il en ressort le besoin d'un développement méthodologique spécifique permettant d'établir un référentiel sur les teneurs en éléments traces dans les sols développés sur roches de socle.

Le projet METOTRASS a élaboré une stratégie d'échantillonnage originale permettant d'optimiser le nombre de prélèvements à engager en vue d'élaborer une carte départementale de référence du fond géochimique. Elle s'appuie sur un croisement entre la connaissance scientifique (géologie, genèse des sols) et les données de géochimie existantes. Des seuils d'anomalie ont été définis à partir des teneurs usuelles rencontrées dans les sols français et validés par les partenaires financiers du projet (ARS des Pays de la Loire, ADEME). Pour s'extraire des influences anthropiques, il est apparu préférable de réaliser les prélèvements en domaine forestier. Le lieu de prélèvement devant être choisi, et ne pouvant donc être systématique, le concept d'une maille propre à chaque zone a été adopté. Les dimensions des mailles sont adaptées à l'hétérogénéité géochimique des objets géologiques définis en fonction de leur lithologie et de leur âge.

Les résultats acquis montrent que la majorité des sols analysés dans le département de la Loire-Atlantique ne présentent pas d'anomalie en éléments traces étudiés. La présence d'anomalies apparaît plus marquée pour l'arsenic, et dans une moindre mesure pour le cuivre. La représentation cartographique des teneurs moyennes en éléments traces des objets géologiques étudiés et des proportions de teneurs correspondant à des anomalies fortes ou très fortes montre dans le cas de l'arsenic une corrélation très nette avec le contexte géologique (périphérie des granites) et tectonique (cisaillement sud armoricain) au sein du département.

L'application de la méthodologie sur le département de la Loire-Atlantique s'est heurtée à plusieurs difficultés dont le manque de cartographie des formations superficielles, et la difficulté de localiser les filons. Ces derniers peuvent être à l'origine d'anomalies élevées.

La méthodologie développée peut s'appliquer à d'autres contextes géologiques, à différentes échelles, et pour des objectifs variés, notamment dans le cadre de recherche de fond géochimique dans les études d'impact ou dans les diagnostics de sols pollués, en les étalonnant cependant par des études détaillées à l'échelle des sites concernés.

Mots clés : méthodologie, teneurs naturelles, géochimie, sols, géologie, socle, département, Loire-Atlantique, stratégie, échantillonnage.

Introduction

Dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires et environnementaux, il est important d'avoir une idée des teneurs présentes naturellement (ou de manière usuelle) dans les sols. Cet état de référence peut servir par exemple d'élément de comparaison dans la gestion des sites et sols pollués, dans le cadre de l'épandage de boues de station d'épuration sur des sols agricoles, ou dans les cas d'appréciations des risques sanitaires (plombémie par exemple).

Etat de l'art

La présence d'éléments traces dans les sols et les eaux peut avoir une origine naturelle (fond géochimique), en lien avec la composition des roches mères à l'origine des sols.

A l'échelle du territoire métropolitain français, il existe des données de géochimie des sols, mais il est difficile de faire la part entre les origines naturelles ou anthropiques des éléments traces. Par ailleurs, l'échelle d'acquisition des données existantes apparaît variable (échelle européenne à très ponctuelle). Parmi les données disponibles, certaines sont acquises avec une approche maillée régulière, comme par exemple celles du réseau de mesure de la qualité des sols agricoles, qui sert de référentiel national ; mais d'autres ont des densités et maillages très hétérogènes.

En domaine de socle, les formations géologiques présentent des géométries et des surfaces très variées. A titre d'exemple, la carte géologique harmonisée du département de la Loire-Atlantique à 1/50 000 présente plus de 300 formations géologiques, dont la taille varie du km² à plusieurs centaines de km². L'utilisation d'une approche maillée régulière comme celle adoptée dans les travaux récents concernant la qualité des sols agricoles (1 point par 16 km²), n'apparaît pas optimale vis-à-vis de l'hétérogénéité lithologique et spatiale de la géologie.

Besoins

Il en ressort le besoin d'un développement méthodologique spécifique permettant d'établir un référentiel sur les teneurs en éléments traces dans les sols développés sur roches de socle.

Une phase préliminaire de test méthodologique (appelée Partie 1) a été réalisée en 2006-2007 sur une dizaine de communes du département de la Loire-Atlantique. La méthodologie développée s'appuie sur la nature et la localisation des roches mères/formations géologiques, pour optimiser le nombre de points de prélèvements en vue d'aboutir à une cartographie des teneurs naturelles en éléments traces. Initiée par le BRGM avec le soutien de l'ARS des Pays de la Loire, ce développement méthodologique s'est poursuivi sur l'ensemble du département de la Loire-Atlantique, avec le soutien de l'ARS (Agence Régionale de Santé) des Pays de la Loire et de l'ADEME.

Le projet METOTRASS vise à élaborer une stratégie d'échantillonnage permettant d'optimiser le nombre de prélèvements à engager en vue d'élaborer une carte départementale de référence du fond géochimique, dont l'échelle de validité dépend de celle des cartes géologiques disponibles utilisées (1/50 000e).

Enjeux

Des enjeux sanitaires et environnementaux sont associés à ce développement méthodologique.

En Loire-Atlantique, la question de l'origine de teneurs en éléments traces se pose sur plusieurs secteurs. De l'arsenic est par exemple fréquemment détecté dans les sols, et parfois aussi dans les eaux. En particulier, plusieurs occurrences de teneurs relativement élevées en arsenic ont été signalées dans les pourtours de Nantes. De fortes teneurs sont également détectées dans certains points de prélèvements d'eaux destinées à la potabilisation. La question de l'origine de teneurs en plomb se pose également sur plusieurs secteurs, notamment à l'occasion d'enquêtes sur des causes potentielles de plombémies.

Un référentiel des teneurs naturelles en élément traces dans les sols peut aussi servir de comparaison dans :

- les études d'impacts réalisées à l'ouverture d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE),
- la gestion des sites et sols pollués pour évaluer les impacts de sites industriels et les risques sanitaires et environnementaux associés,
- les plans d'épandage de boues de station d'épuration, pour anticiper les secteurs où des épandages seront possibles ou pas.

Toutefois, l'acquisition d'informations géochimiques étant coûteuse, il importe d'optimiser l'acquisition et la valorisation des données acquises.

Stratégie

Pour mettre en place la méthodologie à l'échelle départementale, l'idée est de mettre en perspective la connaissance scientifique (géologie, genèse des sols) et les données de géochimie existantes pour élaborer une stratégie d'échantillonnage optimale et permettre un traitement pertinent de l'information ainsi collectée. L'application sur le département de Loire-Atlantique vise à tester la méthodologie.

Le projet cible spécifiquement l'arsenic et le plomb, qui posent des problèmes sanitaires dans le département, ainsi que le cuivre et le zinc, dont l'analyse est effectuée dans les sols avant épandage de boues de station d'épuration. Les autres métaux (Cd et Hg en particulier) ne sont pas étudiés ici car les limites de quantification de l'appareil de mesure utilisé (Fluorescence X portable) sont supérieures aux teneurs pressenties. Un calage des mesures effectuées sur échantillon sec tamisé est prévu avec des analyses classiques par ICP.

Perspectives

Outre le fait de réduire l'incertitude sur les teneurs en éléments traces dans les sols développés sur roches de socle, cette méthodologie vise *in fine* à permettre la cartographie du fond géochimique avec des moyens techniques et financiers optimisés. Le but est d'établir des recommandations méthodologiques dans l'optique d'une utilisation opérationnelle.

Le présent rapport présente l'ensemble du projet METOTRASS. Après une synthèse bibliographique sur l'origine des éléments traces dans les sols de Loire-Atlantique et une présentation des différentes sources de données de géochimie (sols, sédiments principalement) sur le département, la méthode adoptée pour élaborer la stratégie d'échantillonnage est proposée. Le rapport décrit ensuite les campagnes de prélèvements et d'analyses, puis les résultats acquis et leur interprétation.

I - Origine des éléments traces dans les sols de Loire-Atlantique

Ce chapitre présente les différentes sources potentielles d'éléments traces dans le département. Les éléments traces dans les sols peuvent avoir une origine naturelle, mais aussi une origine anthropique. L'origine naturelle apparaît liée au contexte géologique, tandis que l'origine anthropique est liée aux différentes activités humaines (industrie, agriculture, transports...). Le lien entre les sols et les roches mères, ainsi qu'une description succincte des principaux types de sol rencontrés en Loire-Atlantique sont décrits en Annexe 1.

I.1 - Origine des éléments traces dans les sols

Selon Bourrelier et al. (1998), le fond géochimique est la teneur « naturelle ou originelle » en éléments traces trouvée en l'absence de tout processus anthropique d'apport ou d'exportation vers ou hors le site considéré. Elle dépend en premier lieu de la teneur dans la roche qui est à l'origine du sol, mais également des processus qui sont intervenus lors de la formation du sol, qui ont pu lessiver ou concentrer l'élément en question.

La notion de flux de matière est importante. Une anomalie dans les sols se définit en prenant en considération l'environnement dans sa globalité. Une anomalie peut être identifiée à la suite d'un processus d'érosion d'une entité enrichie (érosion, transport et sédimentation) mais aussi suite à l'érosion d'une entité voisine moins riche en éléments traces. Une telle définition nécessite par conséquent une analyse fine du milieu et sur un grand nombre de points de mesures.

La présence d'éléments traces dans un sol peut aussi être liée à des contaminations atmosphériques et anthropiques. Une activité anthropique peut être la source d'une contamination ou d'une pollution des sols. Il y a contamination lorsqu'une substance potentiellement dangereuse est introduite artificiellement dans le milieu naturel. Il y a pollution lorsque la teneur est potentiellement dangereuse par rapport à l'usage du sol, ou lorsqu'elle atteint les valeurs limites fixées par les normes établies (Jeannot et al., 2001).

On distingue deux types de pollution des sols, la pollution ponctuelle (dépôt ou épandage de polluants sur une surface restreinte) et la pollution diffuse (épandage ou retombée de polluants sur une grande surface). Ces pollutions peuvent être accidentelles ou chroniques. Le terme pollution accidentelle (dépôt ou déversement ponctuel de polluant) est utilisé lorsqu'une grande quantité de polluant est déversé sur une faible durée (le plus souvent sur une faible surface) ; le terme pollution chronique concerne les apports continus de contaminants par fuite ou lessivage, ou épandages, dont le cumul (en flux) peut être plus importants que ceux d'une pollution accidentelle (Jeannot *et al.*, 2001).

I.2 - Origine naturelle en Loire-Atlantique

I.2.1 - Contexte géologique

Les terrains de Loire-Atlantique, essentiellement métamorphiques et plutoniques (Illustration 1), constituent le socle sur lequel s'est déposée au Tertiaire une couverture sédimentaire peu puissante. Il existe également dans le sud du département (près de Touvois), des formations très localisées d'âge crétacé supérieur composées essentiellement de sables et d'argiles.

La géologie du département, et notamment les roches de socle, montre une grande complexité liée à la variabilité des âges, des lithologies et aux très nombreux accidents tectoniques. Cette complexité est appréhendée au travers de l'histoire géologique du département, présentée en Annexe 2.

Les formations superficielles apparaissent peu représentées. Elles ne figurent pas sur toutes les cartes géologiques du département, car elles ont été principalement prises en compte dans les levés très récents, les travaux anciens étant en général davantage axés sur la

représentation du substratum. Or, la majorité des cartes géologiques à 1/50 000e couvrant le département de Loire-Atlantique ont été réalisées entre les années 1970 et 1985. Certaines sont toutefois plus récentes, en particulier dans le Nord où elles ont été éditées dans les années 1988-1995 et dans le Sud où les cartes de Montaigu et Palluau sont parues respectivement en 2006 et 2009. Ces dernières représentent mieux les formations superficielles.

Concernant les formations superficielles, il faut aussi préciser que l'ensemble du Massif Armoricaïn a subi des phénomènes importants d'altération, avec des épisodes particulièrement marqués au Crétacé inférieur et à l'Éocène inférieur et moyen qui ont contribué à la création d'altérites meubles sur 20 à 30 m d'épaisseur (Lachassagne *et al.*, 2001 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Lachassagne et Wyns, 2005).

Les marques de cette altération importante se retrouvent notamment au nord du département avec des restes de profils latéritiques surmontés par des cuirasses ferrugineuses, certaines ayant même fait l'objet d'exploitation minière du fer (Le Guern *et al.*, 2009). La carte géologique de Saint-Mars-la-Jaille (421) indique également une importante altération de l'ensemble des roches, particulièrement marquée à l'ouest de la carte. Dans le Sud-Ouest du département, les produits d'altération apparaissent mélangés avec des dépôts éoliens (limons, sables) (Béchenec 2007).

I.2.2 - Formations géologiques porteuses d'éléments traces

En France, Thiéblemont et Bourguignon (1996) ont tenté de définir le fond litho-géochimique (teneurs en éléments trace dans la roche mère) des terrains cristallins français. Ils ont estimé les teneurs moyennes (dont As, B, Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) dans les roches les plus fréquemment représentées dans ces terrains. L'arsenic, le plomb, le zinc et le cuivre font partie des éléments dont le fond litho-géochimique, donc indirectement le fond pédo-géochimique, est plus fortement influencé par des mécanismes géologiques d'ordre régional (tels que le métamorphisme ou des événements tectoniques majeurs) que par la nature de la roche. Ainsi, ces éléments traces sont souvent présents dans les franges externes de certains granites intrusifs, le long des grandes fractures de plusieurs kilomètres d'extension et dans les marges sédimentaires de certains massifs cristallins, ce qui explique leur présence potentielle dans de très nombreuses formations géologiques.

Le Tableau 1 regroupe les formations géologiques des massifs hercynien français, hors massif armoricaïn, où des anomalies en arsenic, cuivre, plomb et zinc ont été relevées (d'après Sonney *et al.*, 2005). Les formations géologiques de lithologie semblable à celles présentant des anomalies en arsenic, cuivre, plomb ou zinc dans les autres massifs hercyniens représentent plus de 30 % de la surface du département. L'Annexe 3 précise les superficies des formations géologiques correspondantes. Le contexte géologique du département de la Loire-Atlantique présente par ailleurs de grands accidents tectoniques, tels que le cisaillement sud-armoricaïn (CSA).

Les enrichissements naturels des roches influencent directement les enrichissements des altérites et des sols associés. En revanche, la présence de limons des plateaux (dépôts post glaciaires) aura pour effet d'amoindrir le signal chimique issu de la roche mère dans les sols en surface (sans pour autant réduire l'influence sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines), sous réserve qu'ils soient d'une épaisseur significative (supérieure à 30-50 cm).

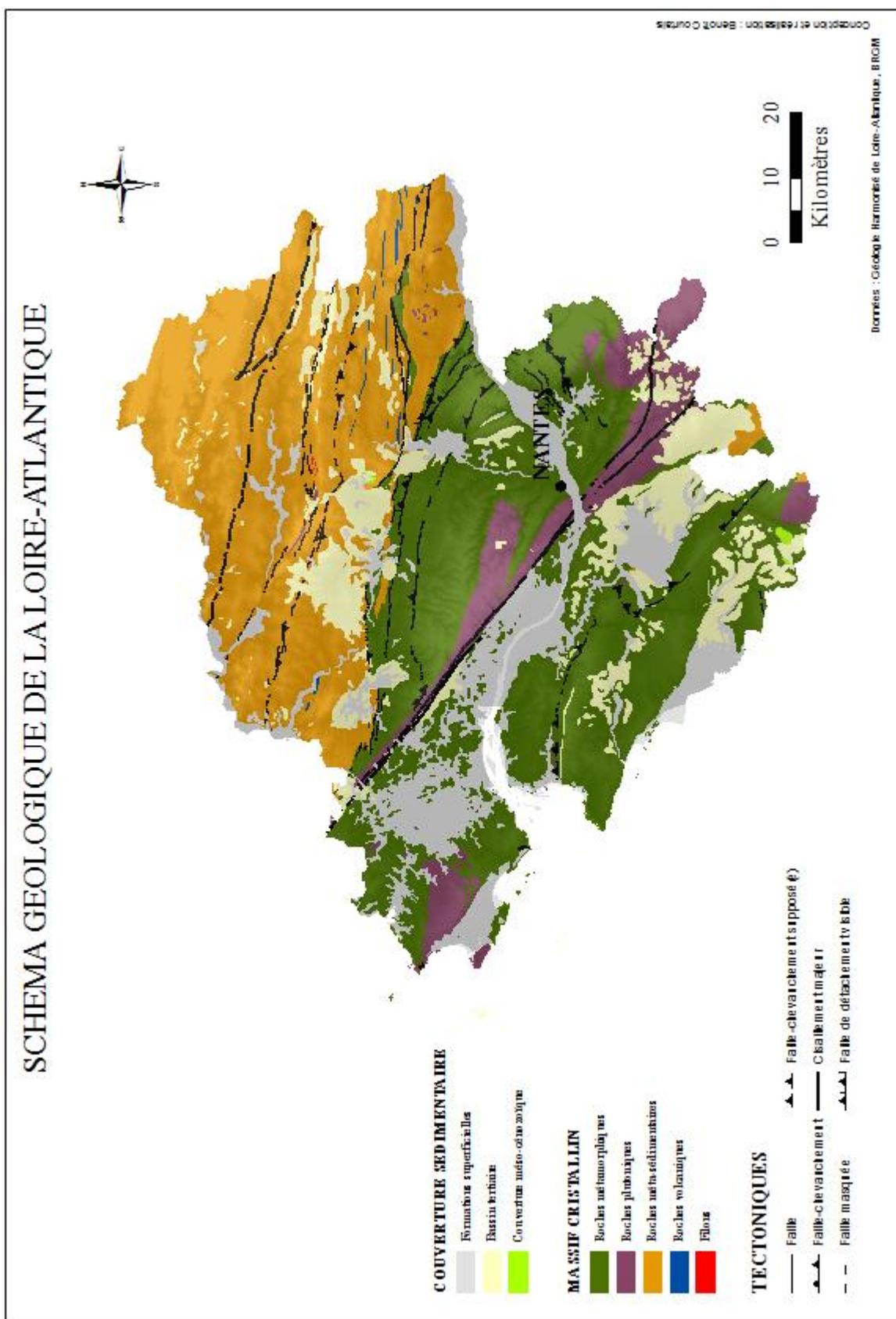


Illustration 1 : Schéma géologique de la Loire-Atlantique (d'après la carte géologique harmonisée 1/50 000, Béchenec, 2007)

	As	Cu	Pb	Zn
Corse granitique et volcanique	Zone de fracturation (extrême sud et rhyolites)	Granites Gabbro, diorite Rhyolites Tufs volcaniques	Granites Rhyolites Tufs volcaniques Grauwackes	Granites Rhyolites Tufs volcaniques Grauwackes
Massif central	Granites (sect. Tarare) Microgranites filoniens (sect. Tarare) Filons quartzeux dans les mylonites silicifiées Dacites, rhyolites et tufs (Viséen) Gneiss Mylonites Couverture métamorphique (Briovérien, Cambrien, Ordovicien)	Granites Contact schistes-gneiss et cornéennes Volcano-sédimentaire (Dévonien) Dacites, rhyolites et tufs (Viséen) Calschistes Couverture métamorphique (Briovérien, Cambrien, Ordovicien)	Granites (dont sect. Tarare, Romanèche) Microgranites filoniens (sect. Tarare) Contact schistes-gneiss et cornéennes Volcano-sédimentaire (Dévonien) Dacites, rhyolites et tufs (Viséen) Calschistes Grauwackes Schistes, micaschistes Gneiss Couverture métamorphique (Briovérien, Cambrien, Ordovicien) Mylonites	Granites (dont sect. Tarare, Romanèche) Microgranites filoniens (sect. Tarare) Contact schistes-gneiss et cornéennes Schistes, micaschistes Gneiss Mylonites Couverture métamorphique (Briovérien, Cambrien, Ordovicien) Mylonites
Montagnes noires	Série schisto-grésocalcaires noire à nodules phosphates (Cambrien) Filons de la zone axiale et de la couverture	Série schisto-grésocalcaires noire à nodules phosphates (Cambrien) Schales noires (Dévonien) Schistes (Carbonifère) Schistes X (anté-cambrien) Filons de la zone axiale et de la couverture	Série schisto-grésocalcaires noire à nodules phosphates (Cambrien) Granites hercyniens Orthogneiss Schistes X (anté-cambrien) Filons de la zone axiale et de la couverture	Série schisto-grésocalcaires noire à nodules phosphates Granites hercyniens Schistes X (anté-cambrien) Filons de la zone axiale et de la couverture
Vosges	Volcano-sédimentaire (Viséen)			

Tableau 1 : Bilan bibliographique des formations géologiques des massifs hercyniens français (hors massif armoricain) où des anomalies en As, Cu, Pb et Zn sont observées (données issues de Sonney et al., 2005)

I.2.3 - Concessions minières, gîtes et indices miniers de Loire-Atlantique

La connaissance des concessions minières et indices miniers constitue une information sur les zones d'anomalies naturelles en éléments traces dans les roches.

Le sous-sol de Loire-Atlantique est, de par son histoire géologique, riche en minerai. On dénombre douze concessions minières sur le territoire départemental entre 1800 et 1991 (Illustration 2). Ces concessions de fer, d'étain, de houille, de plomb ou d'uranium situées essentiellement dans la moitié nord du département, sont des indicateurs de la présence de tel ou tel élément dans les formations concernées.

Ces concessions ont été exploitées avec différentes intensités. L'exploitation de certains gisements a pu engendrer des anomalies d'origine anthropique (terrils, ...). Greffie *et al.* (2004) ont présenté dans leur rapport sur les pollutions relatives aux sites miniers une liste de polluants potentiellement présents dans les sols en bordure d'exploitation (cf. Annexe 4). Outre la richesse naturelle des sols des concessions minières, certains anciens travaux miniers sont ainsi susceptibles de générer des pollutions en arsenic, cuivre, plomb et/ou zinc.

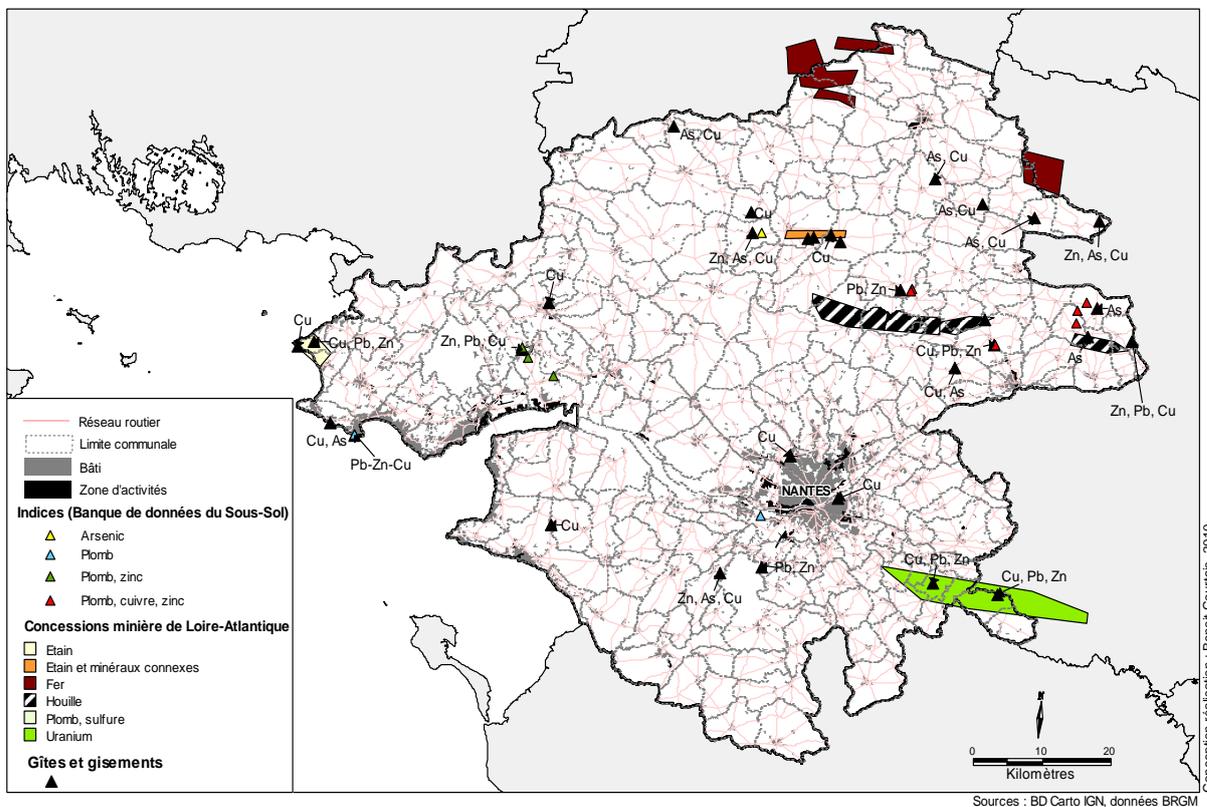


Illustration 2 : Cartographie des concessions minières et des gîtes et indices miniers de Loire-Atlantique

L'illustration 2 recense aussi les principaux gîtes, gisements et indices miniers¹ de Loire-Atlantique où les éléments As, Cu, Pb et Zn ont été rencontrés. Cette source d'information ne précise pas les teneurs des éléments. Cependant elle nous renseigne sur les principaux contextes géologiques associés.

Ces enrichissements présentent différentes structures : en filons, en couches stratiformes ou en amas disséminés. Les principaux enrichissements étudiés sont présents en filons (Annexe 4). Ces filons peuvent être des manifestations hydrothermales liées à des structures tectoniques ou encore à des phénomènes intrusifs. L'arsenic apparaît souvent associé à l'or ainsi que le cuivre à l'étain.

Toutes ces données sont disponibles sur les sites internet suivants : <http://sigminesfrance.brgm.fr> et <http://infoterre.brgm.fr>.

Il faut souligner que la présence des éléments As, Cu, Pb et Zn est limitée aux sols encaissants ces gîtes et indices miniers, mais on ne peut pas extrapoler ce constat à l'ensemble de la formation contenant ces filons.

I.3 - Origine anthropique en Loire-Atlantique

I.3.1 - Occupation des sols

L'occupation des sols est un élément important à prendre en considération pour cette étude. La présence d'éléments traces métalliques dans les sols peut en effet provenir de l'altération de roches du sous-sol mais aussi de l'activité humaine.

Une brève présentation de l'organisation géographique du département est donnée en illustration 3 et dans le Tableau 2 :

La Loire-Atlantique présente d'importantes zones humides (Brière, lac de Grand Lieu, Marais Breton et Marais de Guérande) localisées essentiellement sur le socle métamorphique. La superficie totale de ces zones est de 156 km².

Le sud du département comporte assez peu de forêt, la quasi-totalité se situe sur le socle méta-sédimentaire de la partie nord de la Loire-Atlantique.

Comme tous les départements possédant une surface côtière, la densité du bâti sur le linéaire côtier est importante. L'urbanisation générale se centralise au niveau des métropoles de Nantes et de Saint-Nazaire. Ces deux agglomérations, pôles économiques importants, sont bordées par des zones industrielles conséquentes où l'on observe différentes activités (métallurgie, fonderie, traitement du bois, centrale thermique, unité d'incinération d'ordures ménagères...).

¹ Les indices miniers signalent l'existence en petite concentration de minéraux métalliques non exploités. Le gisement désigne de manière générique un site où l'on rencontre des substances définies. Le gîte est un synonyme de gisement, il est cependant réservé le plus souvent à des masses minérales comportant un ou plusieurs métaux susceptibles d'une exploitation (Foucault et Raoult, 2006)

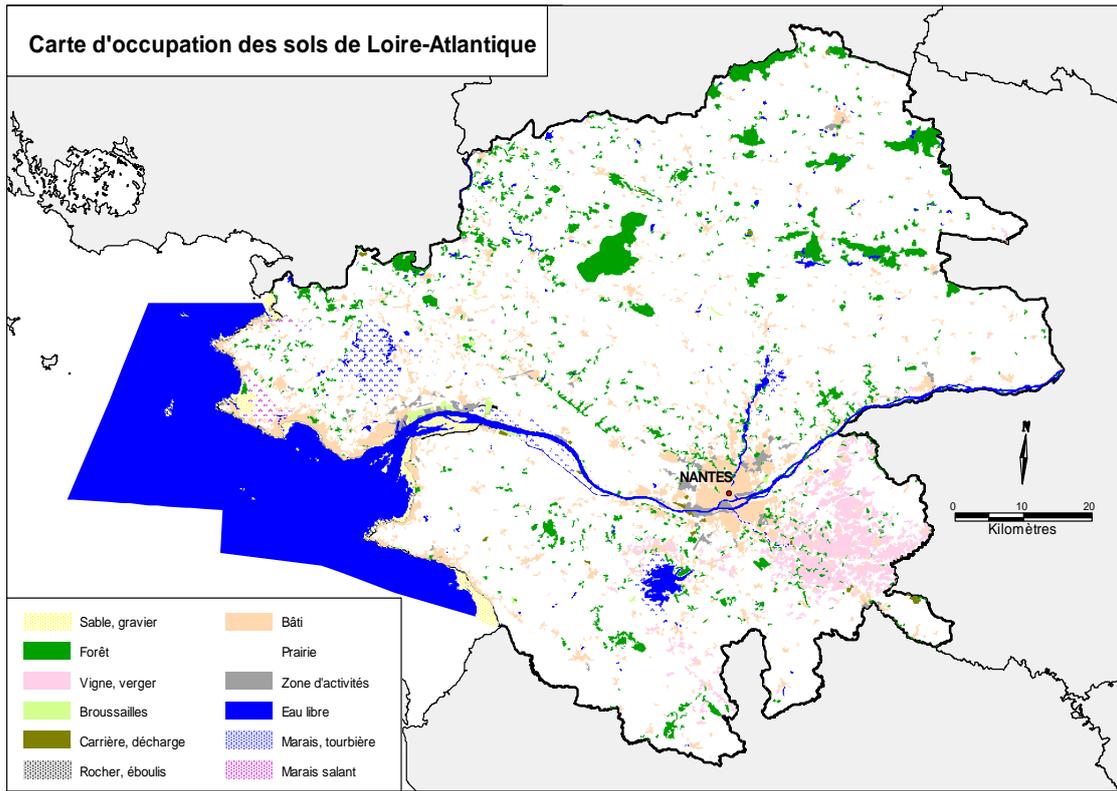


Illustration 3 : Carte d'occupation des sols de Loire-Atlantique (données BD Carto IGN, 2010).

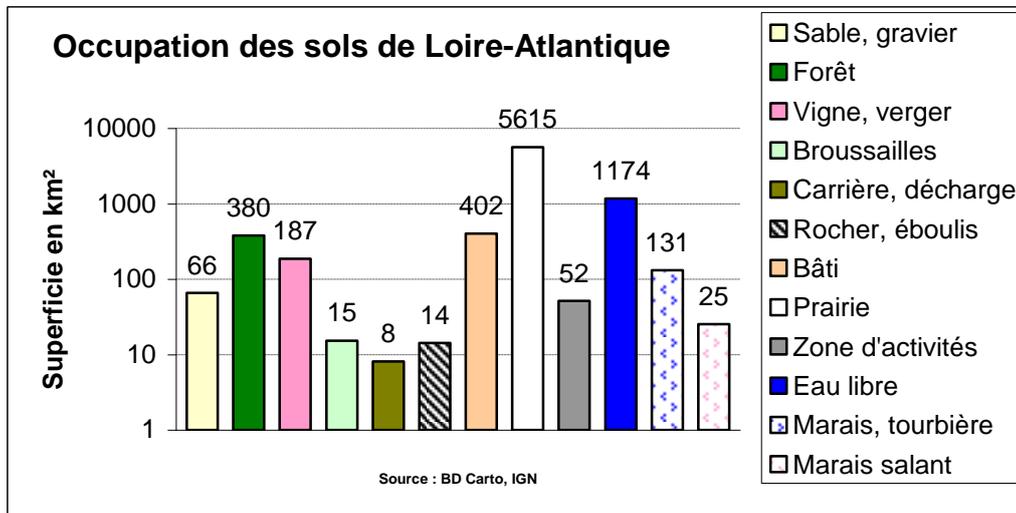


Tableau 2 : Tableau présentant les superficies des différents types d'occupation des sols de Loire-Atlantique (données BD Carto IGN, 2010).

L'activité viticole et arboricole fruitière se centralise exclusivement dans le sud-est du département, elle totalise une surface d'environ 187 km² centrée sur la commune de Vallet. Ce secteur, du fait de ce type d'activité nécessitant des pulvérisations de phytosanitaires apparaît susceptible de présenter des anomalies positives en cuivre, mais aussi en As. En effet, la bouillie bordelaise, à base de sulfate de cuivre, utilisée dans les traitements de la vigne depuis la fin du XIX^{ème} siècle peut contenir jusqu'à 20 % de cuivre « métal » (Laveau, 2005).

I.3.2 - Sites industriels, activités de service

L'activité industrielle, de par les procédés utilisés (attaque acide, lessivage, traitement, pigmentation, refroidissement, combustion, ...) peut être une source de pollution des sols. Le programme BASOL (Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif: <http://basol.ecologie.gouv.fr>, avril 2010) a constaté que 70 % des sites industriels, anciens ou non, recensés dans cette base présentait une pollution caractéristique des sols ou des nappes souterraines. Les 10 principaux polluants rencontrés sont rappelés dans le Tableau 3.

Polluants décelés	
Hydrocarbures	41 %
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	18 %
Plomb	18 %
Zinc	10 %
Solvants halogénés	15 %
Chrome	16 %
Cuivre	15 %
Arsenic	13 %
Nickel	11 %
Cadmium	6 %

Tableau 3 : Liste des 10 principaux polluants constatés (seul ou en mélange) dans les sols ou dans les eaux de nappes d'eaux souterraines à proximité de sites industriels (<http://basol.ecologie.gouv.fr>, avril 2010)

A titre d'exemple, voici pour plusieurs secteurs de l'industrie, la nature des principaux éléments traces métalliques rejetés dans l'environnement (Nowak *et al.*, 2002) :

- Métallurgie et fonderie : Fe, Mn, **Pb**, **Zn**, Cd et Ni ;
- Incinérateurs de déchets : Cd, **Cu**, Cr et **Pb** ;
- Combustion de matériaux fossiles et de carburants : **As**, Hg et **Pb**.

La base de données BASIAS constitue une seconde source d'informations. Elle recense des sites industriels et des activités de service potentiellement polluants de France. 3746 sites (toutes activités confondues) sont identifiés en Loire-Atlantique (<http://basias.brgm.fr>, avril 2010). Les sites saisis dans la base BASIAS sont renseignés sur les périodes d'activités, le type d'activité, la localisation ainsi que différentes informations permettant de caractériser au mieux le site.

I.3.3 - Transports (réseau routier, autoroutes)

Le département de Loire-Atlantique possède le deuxième plus grand réseau routier de la région des Pays de la Loire. Avec une longueur totale de 10 590 km, ce réseau constitue une autre source de pollution des sols en plomb, cuivre et zinc.

Le bilan établi par Pagotto en 1999 (Tableau 4) sur une route 2x2 voies fréquentées par 12 000 véhicules par jour révèle que les contaminations au plomb étaient au moment de l'étude principalement dues aux échappements et aux fuites de carburants ; le cuivre provient majoritairement de la détérioration des garnitures de frein. L'origine du zinc est plus variée : l'usure des pneumatiques, des garnitures de frein ainsi que la lixiviation des revêtements des glissières de sécurité seraient la cause de plus de 7200 g/km/an de zinc sur les bas-côtés.

	Véhicules			Infrastructures		Entretien	Total
	Pneumatiques	Garnitures de freins	Echappement et fluide	Chaussée	Glissières	Sel de déverglaçage	
Plomb	2,6	438	7227	0,01	2,0	8,5	7678
Zinc	3798	2462	48,6	1,5	978	1,3	7289
Cuivre	0,7	16080	19,9	1,4	0,2	3,4	16106
Cadmium	0,9	0,3	0,04	0,002	0,2	0,6	2,0
Chrome	0,2	18,4	1,5	4,3	-	-	24,4

Tableau 4 : Estimation des émissions polluantes (en g/km/an) sur une 2x2 voies à forte circulation (Pagotto, 1999)

Des études menées conjointement par le CERTU et le CETE² Méditerranée ainsi qu'une étude du SETRA³ (2002) ont démontré que :

- dans le cas d'une pollution gazeuse (gaz d'échappement), la corrélation entre la distance à la voirie (50 000 véh/j) et la concentration de polluants est de 300 m ;
- dans le cas d'une pollution particulaire, la corrélation entre les particules de plomb présentes aux abords des routes (de 20 000 véh/j à 76 000 véh/j) était correcte jusqu'à 80 à 160 m.

Il est important de signaler qu'en France, suite à la suppression du plomb tétraéthyle dans l'essence le 1^{er} janvier 2000⁴, les émissions de plomb ont diminué de 95 % entre 1990 et 2002 (passant de 4624 à 217 t/an) (Laperche *et al.*, 2004).

² CERTU : Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

³ SETRA : Service d'Étude sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

⁴ La commercialisation de l'essence sans plomb débute en France en 1990. La substitution totale est décidée par l'arrêté du 23 décembre 1999 et est appliquée en métropole depuis le 2 janvier 2000 (<http://www.senat.fr>, avril 2010)

II - Données de géochimie des sols en Loire-Atlantique

Ce chapitre recense différentes données de géochimie des sols de Loire-Atlantique. Dans la mesure du possible, ces données ont été exploitées pour définir la stratégie d'échantillonnage et/ou l'interprétation des résultats.

II.1 - FOREGS

La base de données européenne FOREGS (FORum of European Geological Surveys) constitue un atlas géochimique européen. Après dix années de recherches et de tests sur l'optimisation de la méthodologie de prélèvement, l'échantillonnage débuta en 1999 et dura 4 ans. Pour des raisons financières, l'Europe a été divisée en cellules carrées de 160 km de côté calquées sur celles du GTN (Global Terrestrial Network, Darnley, 1995). Dans chaque cellule, 5 sites d'investigation sont tirés au hasard. A proximité de ces sites, des prélèvements par « petit bassin » (superficie inférieure à 100 km²) sont effectués dans :

- les eaux de surface (rivière)
- les sédiments de rivière (fraction < 150 µm)
- les sols supérieurs en bas de pente voisine (0-25 cm sans horizon organique, fraction < 2 mm)
- les sols inférieurs sur le même point (sur roche mère ou 1 m environ, fraction < 2mm)

Les échantillons de sols sont qualifiés de composites, ils correspondent en réalité à 3 ou 5 sous-prélèvements distants de 10 à 20 m mélangés. Les échantillons sont ensuite séchés à 40°C, démottés, homogénéisés puis tamisés à 2 mm. Les analyses des éléments traces métalliques ont été effectuées par ICP-MS pour As, Cu et Pb (limites de détection respectivement : 0,2, 0,01, 3 mg/kg) et par fluorescence X pour Zn (limite de détection : 3 mg/kg). La Loire-Atlantique a été échantillonnée dans 2 petits bassins.

L'illustration 4 présente les cartes réalisées à la suite de cette étude. Compte tenu de la large maille d'échantillonnage, ces cartes ne peuvent servir comme référentiel départemental. Elles permettent cependant de déterminer des enrichissements d'échelle régionale. Ainsi, le fond géochimique moyen des sols européens (hors anomalie) est estimé à 6 à 7 mg/kg pour l'arsenic, 13 à 14 mg/kg pour le cuivre, 17 à 23 mg/kg pour le plomb et 47 à 52 mg/kg pour le zinc (<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>). La France apparaît comme étant le pays européen présentant le plus d'anomalies en arsenic avec des concentrations représentées pouvant être jusqu'à quatre fois supérieure à la moyenne européenne. Les plus fortes concentrations en plomb, cuivre et zinc ont aussi été décelées sur le territoire national. Les chaînes hercyniennes, dont le département de Loire-Atlantique fait partie, apparaissent comme des zones d'anomalies fortes pour tous les éléments pris en compte dans la présente étude.

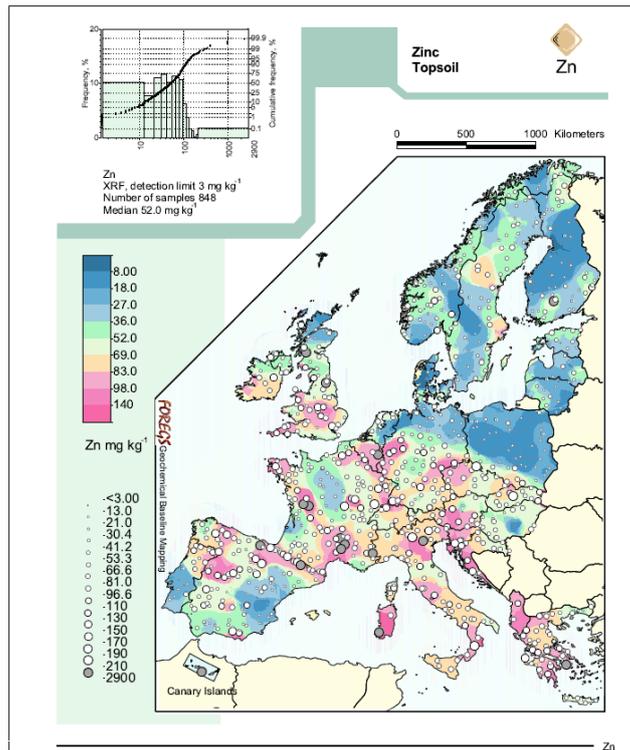
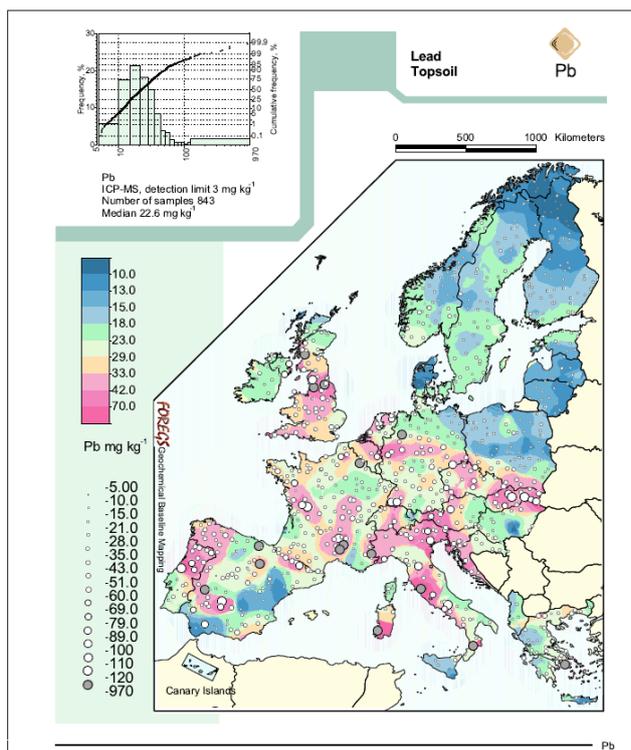
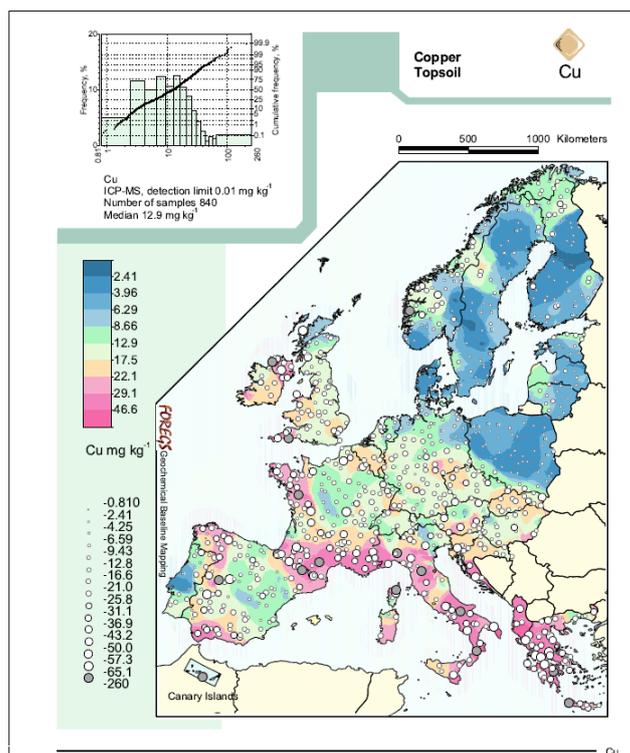
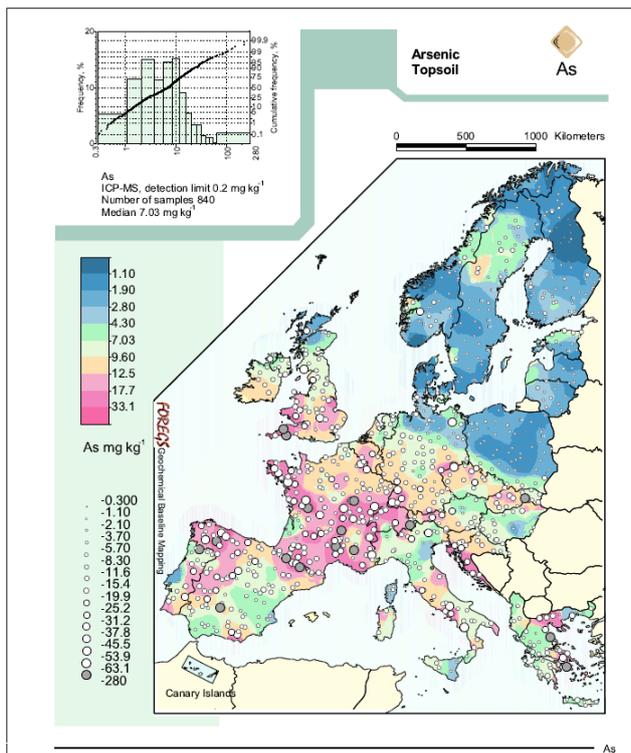


Illustration 4 : Cartographies des résultats de la campagne FOREGS en arsenic, cuivre, plomb et zinc. (<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>)

II.2 - Données de la société Loire 21

La société Loire 21 gère 12 stations d'épuration dont celles de l'agglomération nantaise (Tougas et la Petite Californie), ces deux stations produisent environ la moitié des boues d'épuration du département (soit 11 000 tonnes/an).

Dans le cadre de la valorisation agricole, 80 % des boues départementales sont utilisées comme amendement organique, les 20 % restant sont traitées par incinération ou par enfouissement technique. La société Loire 21 disposait en 2006 d'un plan d'épandage de 11 000 hectares de terres agricoles. Conformément à la loi sur l'eau, elle effectue un suivi analytique des boues mais aussi des sols d'épandage. Dans le cadre de ces analyses, 7 éléments traces sont quantifiés : le cadmium, le chrome, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc. L'illustration suivante montre la répartition et la localisation de ces analyses recueillies lors de la précédente étude (Le Guern *et al.* 2007).

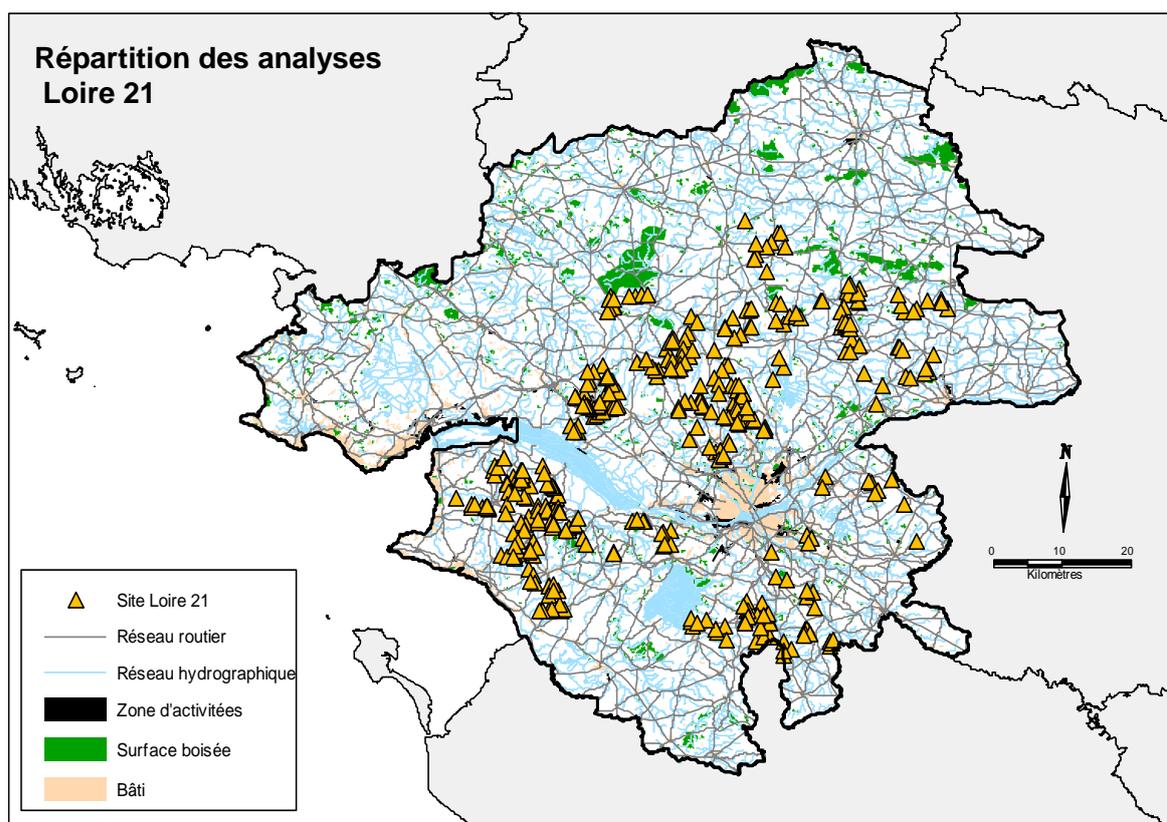


Illustration 5: Carte de répartition des données d'analyses d'éléments traces métalliques mises à disposition par Loire 21 en 2005 sur le département de la Loire-Atlantique (fond de carte BD Carto, IGN)

II.3 - ASPITET, INRA

Le programme « Apport d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces » développé par l'INRA a pour objectif de :

- fournir des références sur les teneurs en éléments traces métalliques mesurées dans les sols français ;
- proposer et expliquer des démarches d'interprétation applicables partout.

La définition du sol choisie pour cette étude est la suivante : "les « sols » sont des formations naturelles, continues, tridimensionnelles, qui résultent de l'altération des roches puis de leur évolution autonome sous l'action de facteurs climatiques et biologiques. Il ne s'agit donc pas

de « terrains » ou de « sites » très anthropisés, tels les terrains industriels ou les anciennes décharges” (Darmendrail *et al.*, 2000).

Les échantillons couvrent inégalement le territoire français et ce sur une quarantaine de départements. Les sols issus des bassins sédimentaires sont majoritaires et ceux issus de roches cristallines sont sous-représentés.

La région Pays de la Loire comportait cinq échantillons de sols (3 en Mayenne, 1 en Sarthe et 1 en Loire-Atlantique). Lors de la précédente étude menée par Le Guern *et al.* (2007), ces données n’ont pas été prises en compte du fait de leur faible nombre.

II.4 - RMQS, INRA

Le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) de l’INRA contient 26 points en Loire-Atlantique. Ce réseau comporte plus de 2000 points de mesure uniformément répartis sur le territoire français. L’échantillonnage est basé sur un réseau de mailles carrées de 16 km de côté. Les prélèvements sont effectués dans les horizons de surface (entre 0 et 20 ou 30 cm de profondeur selon les horizons et la nature des terrains – cultivés ou non) à l’aide d’une tarière pédologique hélicoïdale à main. L’horizon humifère et la litière ne sont pas prélevés. Les échantillons sont dits « composites », ils correspondent à 25 échantillons élémentaires, prélevés sur une surface de 20 m de côté (Jolivet *et al.*, 2006).

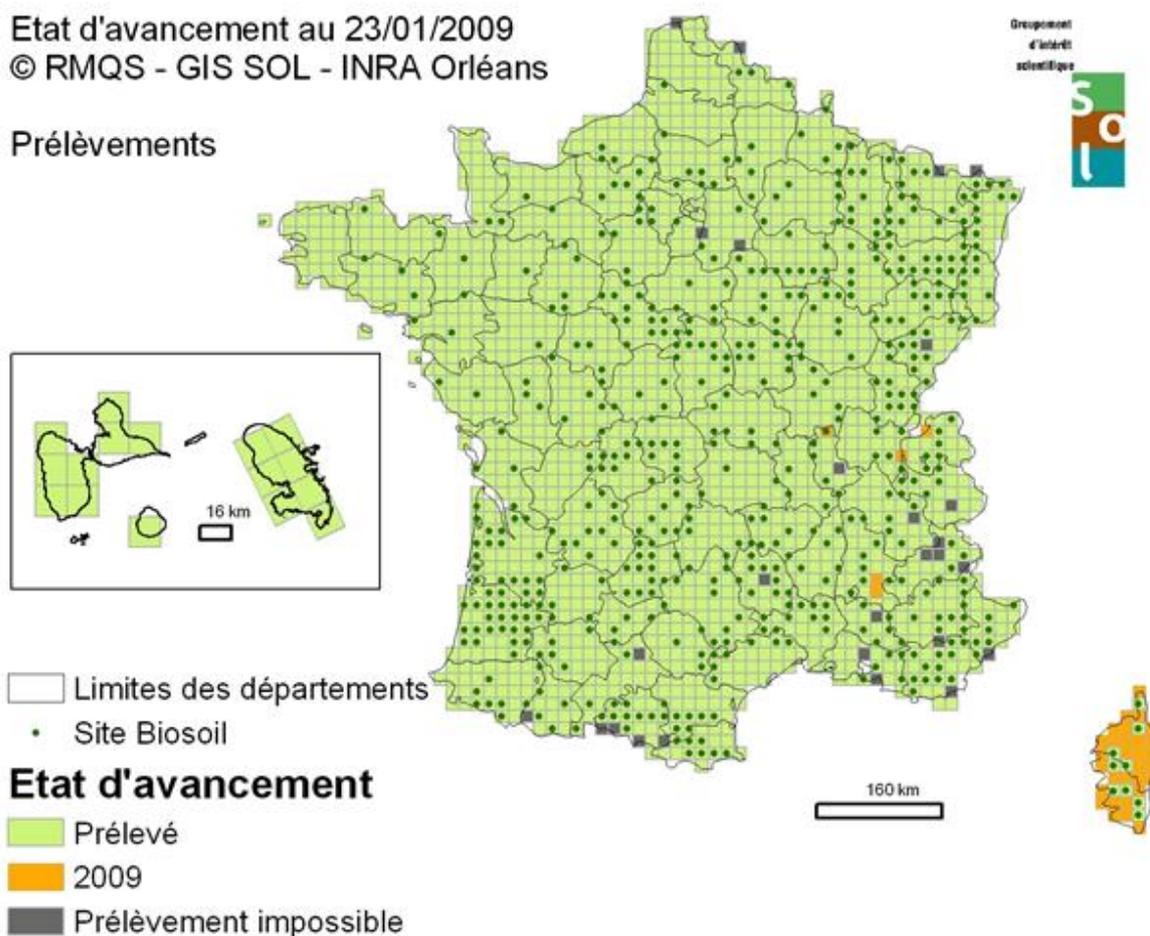


Illustration 6 : Maillage servant au prélèvements d'échantillons de sols pour le RMQS

Ces analyses ne prennent en compte que le cuivre, le plomb et le zinc. Lors de la précédente étude du BRGM menée par Le Guern *et al.* (2007), elles n’ont pas été utilisées du fait

de leur trop faible nombre. Elles n'ont pas été utilisées non plus dans le cadre de la présente étude.

II.5 - BDETM-ANADEME, ADEME, INRA

La base de données ANADEME ou BDETM (Base de Données sur les Eléments Traces Métalliques) a été créée conjointement par l'INRA et l'ADEME. Elle intègre les données sur les éléments traces métalliques acquises entre 1988 et 1998 dans un premier temps. L'intégration de données plus récentes (jusqu'en 2009) a été réalisée dans un deuxième temps (www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php).

Les analyses ont été faites pour l'essentiel en préalable de l'épandage de boues d'épuration sur des surfaces agricoles. Elles concernent différents éléments traces dont le cuivre, le plomb et le zinc et sont réalisées sur les 30 premiers centimètres du sol. Les données de 1988 et 1998 incluent 25 points sur le département, les données plus récentes (jusqu'en 2009) apportent environ 400 points dont plus de la moitié sont géo-référencées.

La demande de mise à disposition de l'ensemble des données concernant la Loire-Atlantique a été acceptée par l'ADEME et l'INRA durant l'été 2012.

II.6 - INVENTAIRE MINIER NATIONAL (IMN), BRGM

L'inventaire minier national constitue la plus grande base de données géochimique disponible, avec 280 000 analyses réparties sur 20 % du territoire départemental. Il débuta en 1975 suite au premier choc pétrolier. Le gouvernement français a voulu relancer l'activité minière et améliorer la connaissance du sous-sol français en réalisant un inventaire des ressources minières qui s'acheva en 1992.

En Loire-Atlantique, l'inventaire a été réalisé en 3 campagnes différentes ; il couvre environ 50 % du département (Illustration 7). Le découpage rectiligne des prélèvements est dû à l'échantillonnage systématique basé sur les cartes topographiques 1/50 000 de l'IGN.

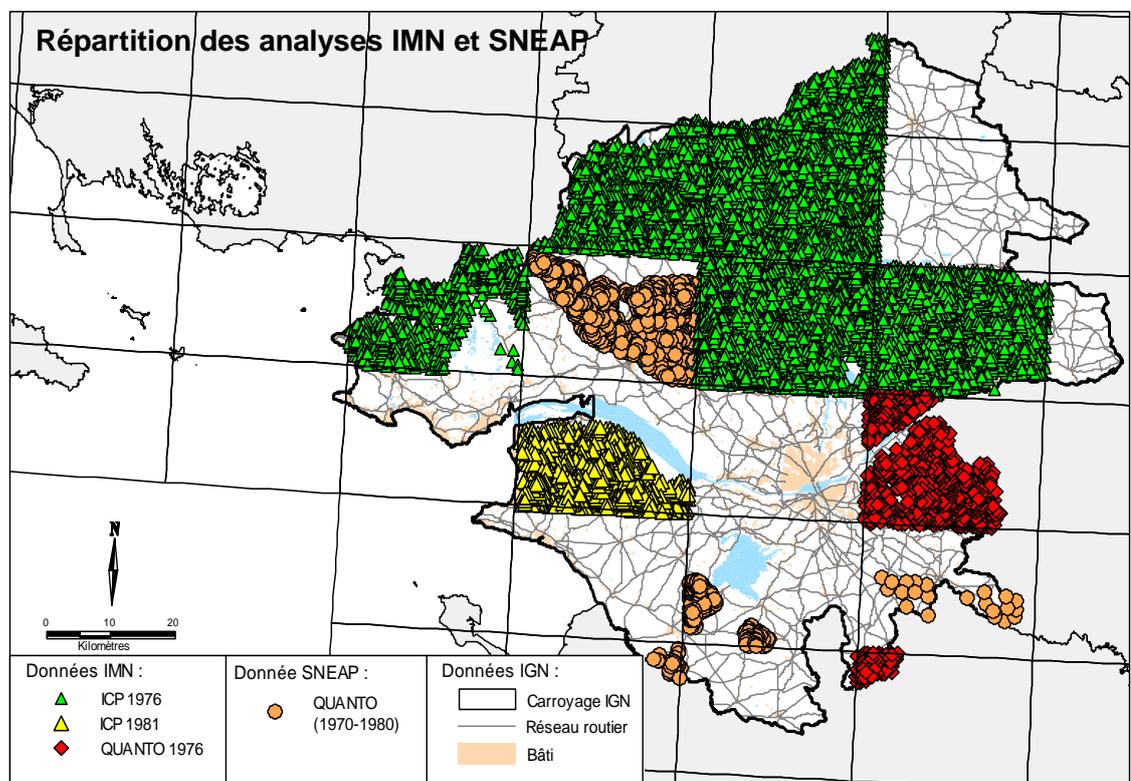


Illustration 7 : Localisation des différentes campagnes de prospections IMN et SNEAP.

Tous les prélèvements du département semblent avoir été faits dans des sédiments limono-vaseux fins déposés par les ruisseaux ou de petites rivières, et quelquefois dans les sédiments résultants de ruissellements de micro bassin dans les vallons en amont des sources.

Les campagnes ne s'étant pas déroulées au même moment, elles ont été faites avec trois méthodes d'analyse différentes :

- Le spectromètre à étincelle avec alimentation par ruban (Quantomètre), utilisée en 1976 (QUANTO76, 949 données).
- Le spectromètre à plasma inductif (ICP). La première campagne fut réalisée en 1976 (ICP 76, 6 647 données) et la deuxième en 1981 (ICP 81, 780 données). Les échantillons ont été mis en solution acide à chaud au moyen d'acide perchlorique (150°C), puis d'acides chlorhydrique et fluorhydrique (85°C) et enfin mis en solution alcaline totale par frittage au peroxyde de sodium. Malgré l'utilisation de ce protocole lors des deux campagnes, le seuil de quantification de certains éléments diffère (Tableau 5).

Limites de détection (mg /kg)	ICP76	ICP81	QUANTO76
As	20	10	5
Cu	5	3	5
Pb	10	15	7
Zn	5	5	16

Tableau 5 : Limites de détection des différentes campagnes IMN

Les trois campagnes totalisent 8376 données en arsenic, cuivre, plomb et zinc géo-référencées.

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air à température ambiante ou à température modérées 50-60°C. Ils ont été ensuite démottés au pilon puis broyés et tamisés à 125 microns afin de ne garder que la fraction fine (Darmendrail *et al.*, 2000). Ces données sont accessibles gratuitement à partir de la plateforme SIG Mines France du BRGM à l'adresse suivante : <http://sigminesfrance.brgm.fr/>, ou Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr/>).

II.7 - Données SNEAP, ELF Aquitaine

Les données SNEAP regroupent environ 60 000 analyses de sédiments. Elles ont été faites par la compagnie SNEAP (Société Nationale Elf Aquitaine Production) suivant le même protocole que l'inventaire minier national (IMN) (analyse au spectromètre à étincelle avec alimentation par ruban-quantomètre). La Loire-Atlantique a été couverte à hauteur de 1121 analyses, correspondant majoritairement à des terrains situés au nord-ouest de Nantes ainsi qu'à quelques zones dans le sud du département.

La répartition des analyses est complémentaire de celle de l'IMN (Illustration 7) et permet donc de couvrir une surface d'observation plus grande.

Ces données n'ont cependant pas été utilisées dans les traitements statistiques car les champs analytiques apparaissent trop restreints. A titre d'exemple, la majorité des données en arsenic disponibles est inférieure à la limite de détection de cet élément, qui s'avère par ailleurs élevée (50 mg.kg-1) et donc non pertinente.

II.8 - Données BRGM-DDASS

Dans le cadre de la cartographie des teneurs en arsenic et plomb dans les sols d'un ensemble de communes de Loire-Atlantique, Le Guern *et al.* (2007) ont sélectionné dix communes réparties sur quatre secteurs de Loire-Atlantique présentant des enrichissements en arsenic et plomb différents (Nord de Nantes, Pays d'Ancenis, Pays de Retz et Sud-est de l'agglomération nantaise). Neuf des dix communes présentent des anomalies en arsenic et plomb.

Sur la centaine de prélèvements effectués lors de cette étude, 30 % correspondent à des anomalies fortes à très fortes en arsenic (concentrations supérieures à 50 mg/kg) et seulement 6 % des échantillons montrent une anomalie forte en plomb (concentrations supérieures à 100 mg/kg).

La comparaison entre les données de cette étude et celles de l'inventaire minier national (IMN) indique que les teneurs moyennes de l'IMN sont généralement plus fortes. L'explication peut-être due à la différence du mode d'échantillonnage (sol ou sédiment) et de préparation (broyage puis tamisage à 0,125 mm pour l'IMN, contre tamisage à 2 mm pour les données BRGM-DDASS).

L'illustration 8 et l'illustration 9 montrent de forts contrastes de concentrations entre les formations géologiques.

Les sols développés sur certaines formations sédimentaires présentent de fortes teneurs en arsenic et plomb. Sur les alluvions anciennes (As) et récentes (Pb), il s'agit probablement d'effets intégrateurs locaux (Le Guern *et al.*, 2007), en lien avec l'érosion de roches environnantes naturellement enrichies, et/ou de pollutions liées à l'utilisation dans le passé de désherbants arséniés (dans des parcelles de prairies notamment). Compte-tenu du contexte géologique et des observations de terrain, les fortes teneurs rencontrées dans les sols issus des formations grésopélitiques du synclinal d'Ancenis sont vraisemblablement liées à la présence de filons ou de lentilles de microgranites non cartographiés.

De fortes teneurs en arsenic et plomb sont rencontrées dans les sols développés sur les roches plutoniques (microgranites, rhyolite et granites) de Mésanger.

Sur les secteurs échantillonnés, les formations métamorphiques semblent moins riches en arsenic et plomb que les formations plutoniques. Certains sols développés sur des micaschistes présentent des anomalies en arsenic. Les fortes concentrations en arsenic dans les sols issus des amphibolites pourraient être en partie dues à des contaminations anthropiques liées à la viticulture. Les amphibolites peuvent cependant montrer un enrichissement effectif en arsenic (Le Guern *et al.*, 2007).

Cette étude (Le Guern *et al.*, 2007) propose une liste de roches présentes dans le département susceptibles de présenter des enrichissements naturels en arsenic et plomb, c'est-à-dire des teneurs supérieures aux teneurs moyennes usuelles :

- Granites et microgranites (ainsi que leur auréole périphérique) : potentiel fort.
- Zones de failles : potentiel moyen à fort selon l'importance de la faille et selon qu'elle a conduit à des circulations hydrothermales.
- Roches métamorphique : potentiel moyen (filons possibles)
- Volcano-sédimentaire : potentiel fort, notamment à Saint-Georges sur Loire. L'hydrothermalisme lié au volcanisme a pu créer des filons enrichis. La reprise de ces filons lors des phases d'érosion, transport et sédimentation a ensuite pu créer des zones d'enrichissements particulières.
- Sédimentaire tertiaire : potentiel faible.
- Alluvions : potentiel variable, selon le contexte géologique, (en faisant toutefois attention à l'intégration possible de pollutions d'origine anthropique).

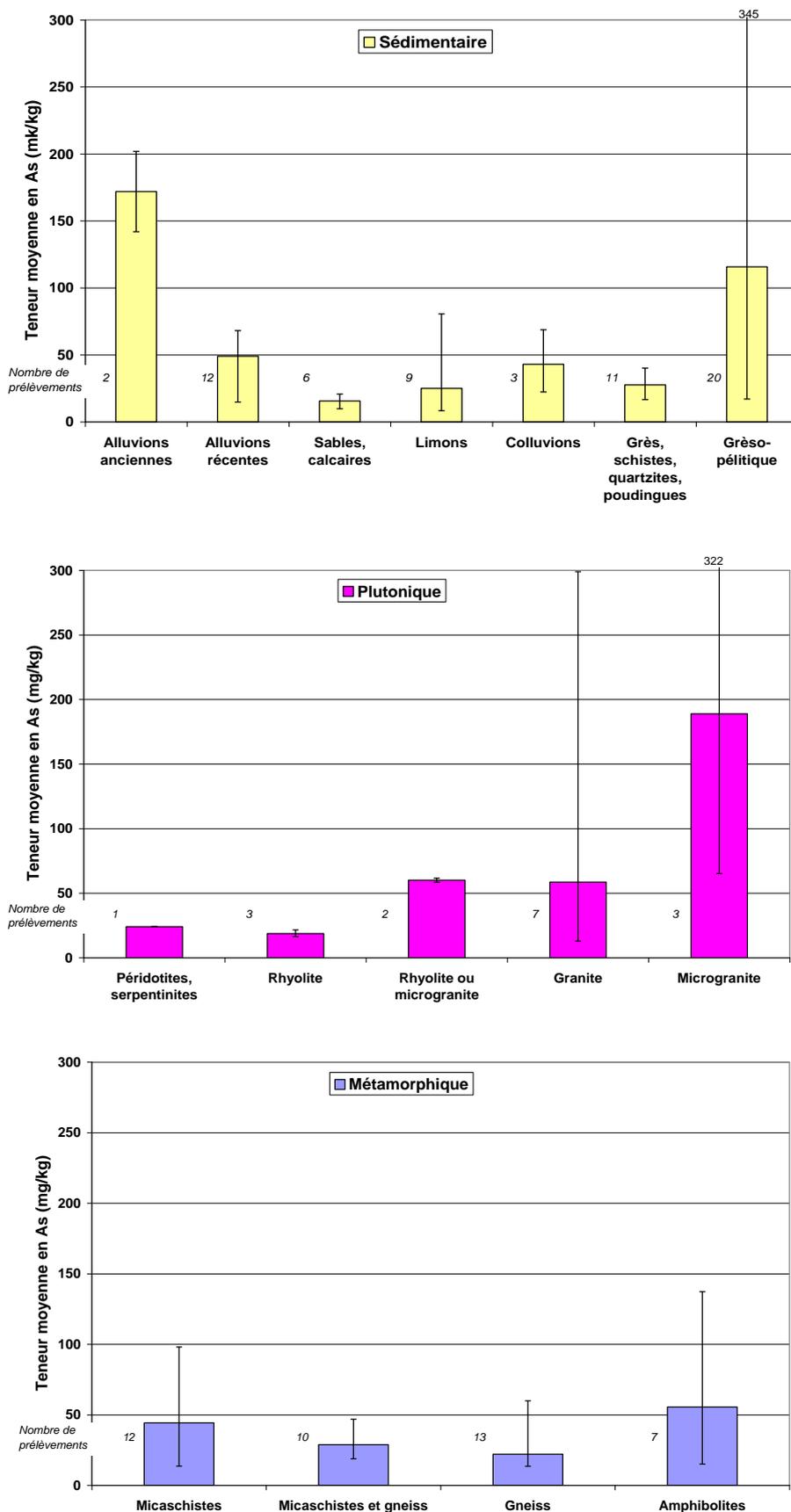


Illustration 8 : Statistiques (moyenne arithmétique, min, max) par type de formation géologique des teneurs en As dans les échantillons prélevés et analysés lors de l'étude 2006 (Le Guern et al., 2007)

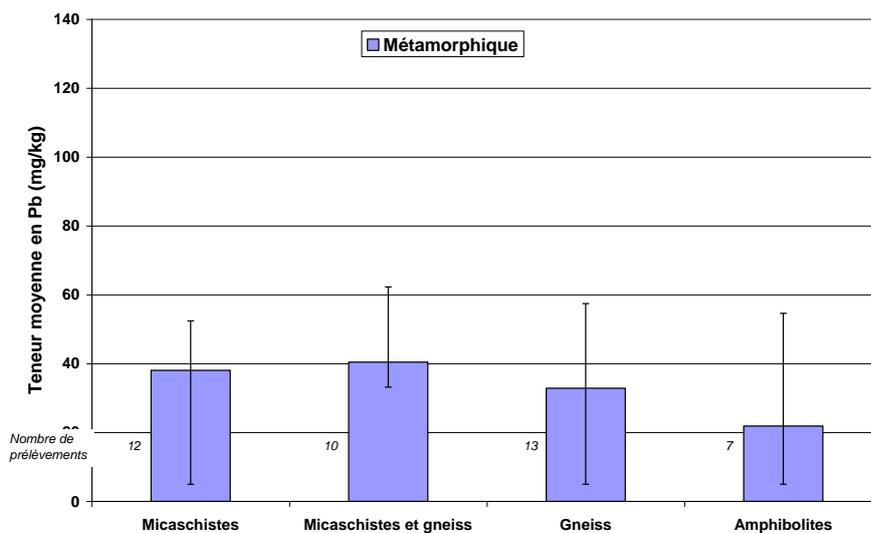
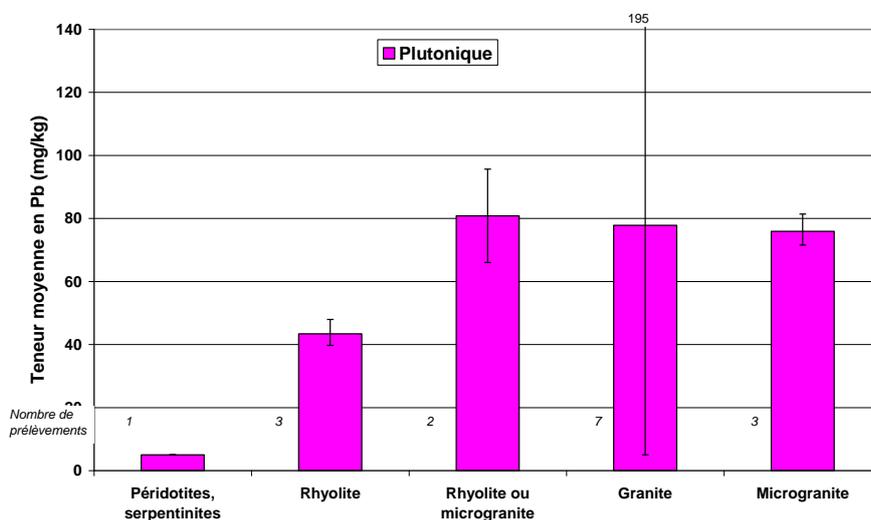
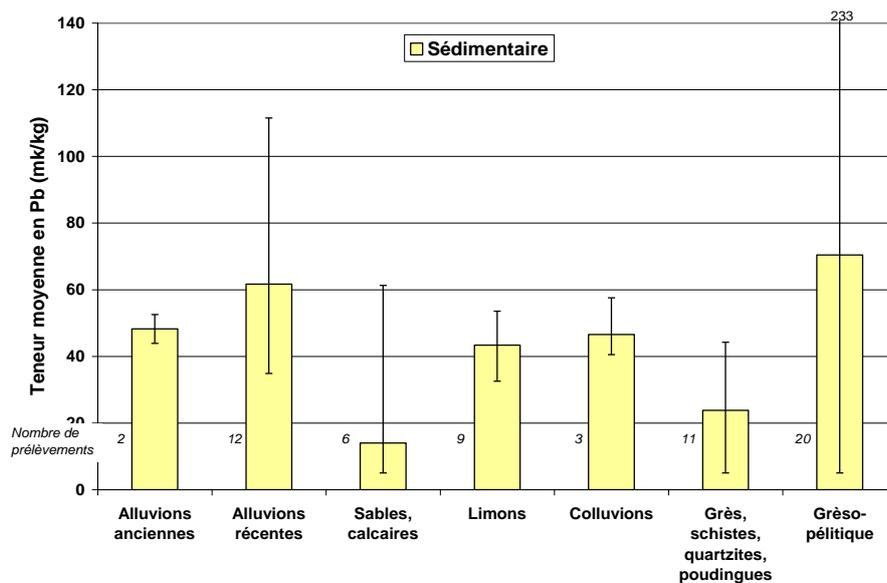


Illustration 9 : Statistiques (moyenne arithmétique, min, max) par type de formation géologique des teneurs en Pb dans les échantillons prélevés et analysés lors de l'étude 2006 (Le Guern et al., 2007)

III - Stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage vise à placer sur l'ensemble du département les 350 points de prélèvements envisagés dans ce programme. Il est prévu d'ajuster la **densité de points de prélèvements** en fonction des connaissances sur la géologie et des données existantes sur une partie du département. Elle sera :

- **faible** sur les secteurs déjà couverts, notamment par l'inventaire minier national, et ne montrant pas d'enrichissements particuliers,
- **significative** dans les secteurs à anomalie constatée, avec des nuances selon le degré d'hétérogénéité de la géologie et de la géochimie,
- **importante** dans les secteurs non couverts (par l'inventaire minier), et présentant une géologie susceptible de conduire à des enrichissements hétérogènes dans les sols,
- **faible à moyenne** dans les secteurs non couverts par l'inventaire minier et présentant une géologie susceptible de conduire à des enrichissements homogènes des sols.

L'élaboration de la stratégie d'échantillonnage s'est appuyée d'une part sur l'analyse statistique des données de l'inventaire minier national (préalablement triées des anomalies susceptibles d'être d'origine anthropique), ainsi que sur un regroupement des formations géologiques du département et l'analyse de leur hétérogénéité potentielle vis-à-vis d'enrichissement en éléments traces.

III.1 - Tri des données de l'inventaire minier national

Comme évoqué précédemment, diverses activités anthropiques sont source de contamination en éléments traces du milieu naturel. Afin de ne pas fausser les interprétations, tous les points de mesures anomaux dont l'origine anthropique a pu être fortement suspectée ont été retirés. Pour ce faire, un traitement cartographique a été mené avec les données issues du recensement des anciens sites industriels BASIAS, avec l'occupation des sols (vignes en particulier) et avec les traces d'activité minière (terrils).

Les campagnes IMN s'étant déroulées sur trois phases différentes, les sites BASIAS dont les dates de début d'activité étaient inférieures ou égales à la date de clôture de la campagne de prospection ont été sélectionnés. Ainsi, concernant la campagne de prospection ICP76, 668 sites BASIAS ont été retenus, 191 pour la campagne ICP81 et 176 pour la campagne QUANTO76.

Par ce traitement cartographique, 42 points d'analyses IMN ont été attribués à des pollutions et 16 suspectés d'être liés à une pollution anthropique. Parmi ces 56 points de prélèvement IMN, 44 sont situés à moins de 500 m d'un site industriel. L'illustration 10 présente le cas d'une pollution liée à différents anciens sites industriels. On observe, et cela pour tous les éléments étudiés des traces de pollution aux abords d'une ancienne fonderie de cuivre ainsi que d'une usine de production et de stockage de produits agrochimique (phytosanitaire, fongicide, insecticide, etc.). On constate aussi sur cette carte un autre exemple de pollution anthropique du réseau hydrographique. En effet, nous pouvons suivre au sud de l'agglomération une présence de plomb d'origine inconnue. Les concentrations en plomb s'amenuisent par dilution jusqu'à devenir minimales en aval.

Le cuivre et l'arsenic ont été extrêmement employés dans les traitements viticoles (phytosanitaires et autres traitements du bois). Ces traitements n'ayant pas forcément été faits dans des conditions météorologiques optimales, on retrouve des pollutions en cuivre et arsenic à l'intérieur et jusqu'à 100 m des parcelles agricoles.

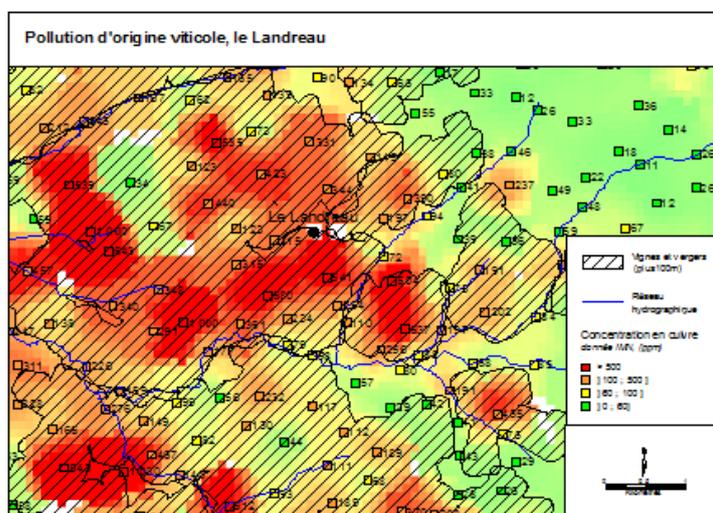


Illustration 12 : Exemple de pollution d'origine viticole

Afin d'écarter des analyses ces données correspondant à des pollutions, il a été effectué de manière systématique, un filtre excluant les points de mesure se situant sur une parcelle viticole ou un verger, ainsi que tous les points présents à moins de 100 m de celles-ci.

Les alluvions et colluvions du département présentent des teneurs significatives en éléments traces analysés dans cette étude, sans pour autant que leur répartition puisse être attribuée sans ambiguïté à une origine naturelle ou anthropique. De ce fait, il a paru préférable d'exclure les données IMN correspondantes de tous les traitements. De plus, constatant les pollutions présentes dans le sud-est du département, la totalité de données issues de la campagne de prélèvement QUANTO76 a été exclue du traitement.

III.2 - Définition des classes d'anomalies

Afin de traiter les données, des classes d'anomalies ont été définies et utilisées. Lors de la phase 1 du projet (Le Guern *et al.*, 2007), les classes d'arsenic et de plomb ont été définies conjointement par le BRGM et la DDASS de Loire-Atlantique (Tableau 6). La définition de telles classes se base sur l'aspect sanitaire (toxicité et normes) et l'aspect géologique (bilan bibliographique). Pour la présente opération, le seuil d'anomalie pour l'As a été élevé à 25 ppm pour mieux correspondre aux observations sur les sols « ordinaires » (Baize, 2004)

	Anomalie	As	Pb
	Aucune	≤ 25	≤ 60
	Modérée	25-50	60-100
	Forte	50-100	100-500
	Très forte	> 100	> 500

Tableau 6 : Classes de concentrations (mg/kg) en arsenic et plomb (modifié d'après Le Guern *et al.*, 2007)

Le Tableau 7 présente les gammes de concentrations en cuivre et zinc retenues pour caractériser les concentrations mesurées en Loire-Atlantique et *a fortiori* dans les sols en domaine de socle hercynien. Elles ont été établies en s'appuyant sur les gammes de valeurs fréquemment rencontrées dans les sols (Baize, 2000, 2004, 2008) (Tableau 8). Baize définit sur cette base 3 classes d'anomalie. Comme pour l'arsenic et le plomb, une classe d'anomalie « très forte » a été ajoutée ici pour prendre en compte le contexte local, où de très fortes teneurs sont susceptibles d'être rencontrées. Ces classes ne prennent pas en compte les valeurs limites réglementaires relatives aux normes d'épandages de boues de station d'épuration, car elles correspondent à des seuils d'acceptabilité des sols (pouvant être fortement anthropisés) pour recevoir ces boues (Tableau 9).

	Anomalie	Zn	Cu
	Aucune	≤ 100	≤ 20
	Modérée	100-250	20-60
	Forte	250-1000	60-100
	Très forte	> 1000	> 100

Tableau 7 : Classes de concentration (mg/kg) en cuivre et zinc proposées.

gammes de valeurs (ppm)	sols "ordinaires" de toutes granulométries	anomalies naturelles modérées	fortes anomalies naturelles (maximales)
As	1 à 25	30 à 60 ⁽¹⁾	> 60 (284) ⁽¹⁾
Cd	0,05 à 0,45	0,70 à 2 ^{(1) (2) (3) (4)}	> 2 ^{(1) (2) (4)}
Cr	10 à 90	90 à 150 ^{(1) (2) (3) (4) (5)}	> 150 ^{(1) (2) (3) (4) (5) (8) (9)}
Co	2 à 23	23 à 90 ^{(1) (2) (3) (4) (8)}	> 105 ⁽¹⁾
Cu	2 à 20	20 à 62 ^{(1) (4) (5) (8)}	> 65 ⁽⁸⁾
Ni	2 à 60	60 à 130 ^{(1) (3) (4) (5)}	> 130 ^{(1) (4) (5) (8) (9)}
Pb	9 à 50	60 à 90 ^{(1) (2) (3) (4)}	> 100 (~3000) ^{(1) (3)}
Zn	10 à 100	100 à 250 ^{(1) (2)}	> 250 ^{(1) (3)}
⁽¹⁾ zones de « métallotectes » à fortes minéralisations (à plomb, zinc, barytine, fluor, pyrite, antimoine) au contact entre bassins sédimentaires et massifs cristallins. Notamment roches liasiques et sols associés de la bordure nord et nord-est du Morvan (Yonne, Côte d'Or).			
⁽²⁾ sols argileux développés sur certains calcaires durs du Jurassique moyen et supérieur (Bourgogne, Jura).			
⁽³⁾ paléosols ferrallitiques du Poitou (« terres rouges »).			
⁽⁴⁾ sols développés dans des « argiles à chailles » (Nièvre, Yonne, Indre).			
⁽⁵⁾ sols limono-sableux du Pays de Gex (Ain) et du Plateau Suisse.			
⁽⁸⁾ sols d'altération d'amphibolites (région de La Châtre – Indre).			
⁽⁹⁾ matériaux d'altération d'amphibolites (région de La Châtre – Indre).			

Tableau 8 : Gammes de valeurs en ppm dites ordinaires ou anormales (modifié d'après Baize, 2000, 2004 et Baize et al., 2008)

Éléments traces métalliques recherchés	Valeur limite réglementaire (seuil supérieur en mg/kg de matière sèche)
Cd	2
Cr	150
Cu	100
Hg	1
Ni	50
Pb	100
Zn	300

Tableau 9 : Valeurs limites réglementaires en éléments traces métalliques dans les sols agricoles avant épandages des boues issues du traitement des eaux usées (arrêté du 8 janvier 1998)

III.3 - Analyse statistique

Une analyse statistique des données de l'IMN triées a été menée. Les méthodes statistiques classiques (moyenne, écart type, boîtes à moustache) et plus élaborées (Classification Ascendante Hiérarchique) ainsi que les géostatistiques (variogrammes), appliquées sur la géologie harmonisée à 1/50 000e n'ont pas permis de dégager de tendance.

III.4 - Regroupements lithologiques

Face aux difficultés rencontrées avec les méthodes statistiques, et dans le but d'optimiser les prélèvements, les lithologies dont la signature chimique est similaire ont été regroupées en s'appuyant sur l'étude bibliographique, l'étude statistique des données IMN et sur l'expérience de différents intervenants du projet.

La carte géologique harmonisée au 1/50 000 du département comprend 98 lithologies différentes. Un premier tri des lithologies de superficie totale supérieure à 10 km² a été effectué. Les lithologies ayant une aire inférieure à 10 km² mais étant potentiellement propice à de fortes concentrations en éléments traces ont été conservées pour la suite du traitement.

La carte géologique harmonisée ayant été conçue suivant des règles topologiques strictes, elle contient des polygones d'eau, de remblais et autres caractérisations de surfaces non spécifiquement géologiques. Toutes ces « lithologies » ont été exclues ainsi que les alluvions et colluvions pour lesquels il est difficile d'identifier l'origine des éléments traces. Ce premier tri a permis de retirer 22 « lithologies ».

Les différentes formations géologiques restantes ont ensuite été regroupées par affinité géochimique. Le Tableau 10 présente le résultat de ce classement. Les microgranites sont représentés dans deux classes à titre de test (classe 3 et 11). La classe 11 n'a pas été prise en compte dans l'analyse à cause de sa petite superficie (3,13 km²), cependant elle nous permettra *a posteriori* de caractériser sa signature chimique.

Le groupe 12 correspond au gneiss dont les informations sur les protolithes dans les notices géologiques sont imprécises⁵.

⁵Ils sont principalement situés sur les feuilles de Savenay, Nort-sur-Erdre, Ancenis et Saint-Philbert-de-Grand-Lieu. Ces gneiss font partie de trois unités géologiques, l'Unité de Saint-Nazaire/Saint-Brévin, l'Unité de Champtoceaux et l'unité des Essarts. Ceux de l'Unité de Saint-Nazaire/Saint-Brévin ont été exclus de l'analyse lors du précédent tri (étendues géographiques inférieure à 5 km²). Les gneiss de l'unité des Essarts sont caractérisés par des intercalations basiques et ultrabasiques ainsi que des contacts avec les formations basiques de cette même unité (éclogites et amphibolites) (Ters et al., 1982). La signature chimique de cette lithologie semble être mixte, mais devrait présenter une forte influence des roches basiques. Les gneiss de l'unité de Champtoceaux ont une autre particularité. Ils représentent un mélange d'anciennes roches feldspathiques relevant, en partie, d'une reprise tectonique à partir de complexes plutoniques, mais aussi de leptynite et de gneiss anatectiques du type Champtoceaux. Ces gneiss dits « plagioclasiques » se chargent progressivement en disthène, vers l'Ouest à partir d'Héric (Barbaroux et al., 1983). Ces deux gneiss sont

Code	Lithologies
1	amphibolite, dolérite, éclogite, gabbro, méta-gabbro, microdiorite, péridotite, pyroxénite, schiste vert, serpentinite, spilite
2	anatexite, gneiss leptynitique, gneiss migmatitique, gneiss ocellé, granite, granite d'anatexie, granite porphyroïde, kérotophyre, leptynite, méta-rhyolite, microgranite, orthogneiss, rhyolite, tuf rhyolitique
3	argile, argile sableuse, argile charbonneuse, argile schisteuse, argilite silteuse, méta-siltite, micaschiste, micaschiste à silicates d'alumine, micaschiste feldspathique, schiste, schiste albitique, schiste ardoisier, schiste noir, schistes ampéliteux
4	arkose, grès, grès feldspathique, grès fin, grès grossier, grès micacé
5	grès quartzite, grès siliceux, jaspé, lydienne, quartz filonien, quartzite
6	leucogranite, pegmatite
7	migmatite
8	grano-diorite, grauwacke, lamprophyre, méta-grauwacke, monzogranite
9	mylonite
10	sable (hors placage)
11	microgranite
12	gneiss
13	calcaire, calcaire argileux, calcaire bioclastique, calcaire construit, calcaire gréseux, calcaire sableux, cipolin, falun, marne calcaire, marne sableuse

Tableau 10 : Regroupements lithologiques et codification associée

Comme évoqué précédemment, l'histoire géologique du département est riche et variée. Des lithologies identiques ont des histoires et des génèses différentes. La prise en compte de ces particularités passe par la différenciation des lithologies selon leur rattachement à une unité géologique. Le département comprend 21 unités différentes, auxquelles a été attribué un code allant de « a » à « v » (Tableau 11).

classés dans les mêmes lithologies. Cependant, ils devraient présenter différentes signatures chimiques. Celui de l'unité de Champtoceaux tend vers une signature acide et celui de l'unité des Essarts vers une signature légèrement basique. Ces gneiss seront différenciés dans l'analyse durant l'étape suivante prenant en considération les histoires géologiques des unités.

Code	Unité géologique
a	Sillon houiller de Basse-Loire
b	Sillon houiller vendéen
c	Unité briovérienne de Bretagne centrale
d	Unité de Champtoceaux
e	Unité de Chantonay
f	Unité de Groix-Céné
g	Unité de Mauves-sur-Loire
h	Unité de Paimboeuf-Montaigu
i	Unité de Péaule
k	Unité de Saint-Georges-sur-Loire
l	Unité de Saint-Gilles-La Vilaine
m	Unité de Saint-Julien-de-Vouvantes
n	Unité de Saint-Mars-la-Jaille
o	Unité de Saint-Martin-des-Noyers
p	Unité de Saint-Nazaire/Saint-Brévin
q	Unité des Essarts
r	Unité des Landes de Lanvaux
s	Unité des Mauges
t	Unité du Bassin d'Ancenis
u	Unité du Haut-Bocage
v	Unité du Sud de Rennes

Tableau 11 : Codification des unités géologiques décrites par Béchenec (2007)

Finalement, 77 objets géologiques différents sont obtenus. Ils sont caractérisés par un attribut composé du « code de l'unité géologique » suivi du « code lithologique ».

Compte tenu du nombre d'échantillons prévus (350), seuls ont été sélectionnés pour la suite les objets cartographiques ayant une superficie supérieure ou égale à 20 km². Un total de 36 occurrences est ainsi conservé (Illustration 13).

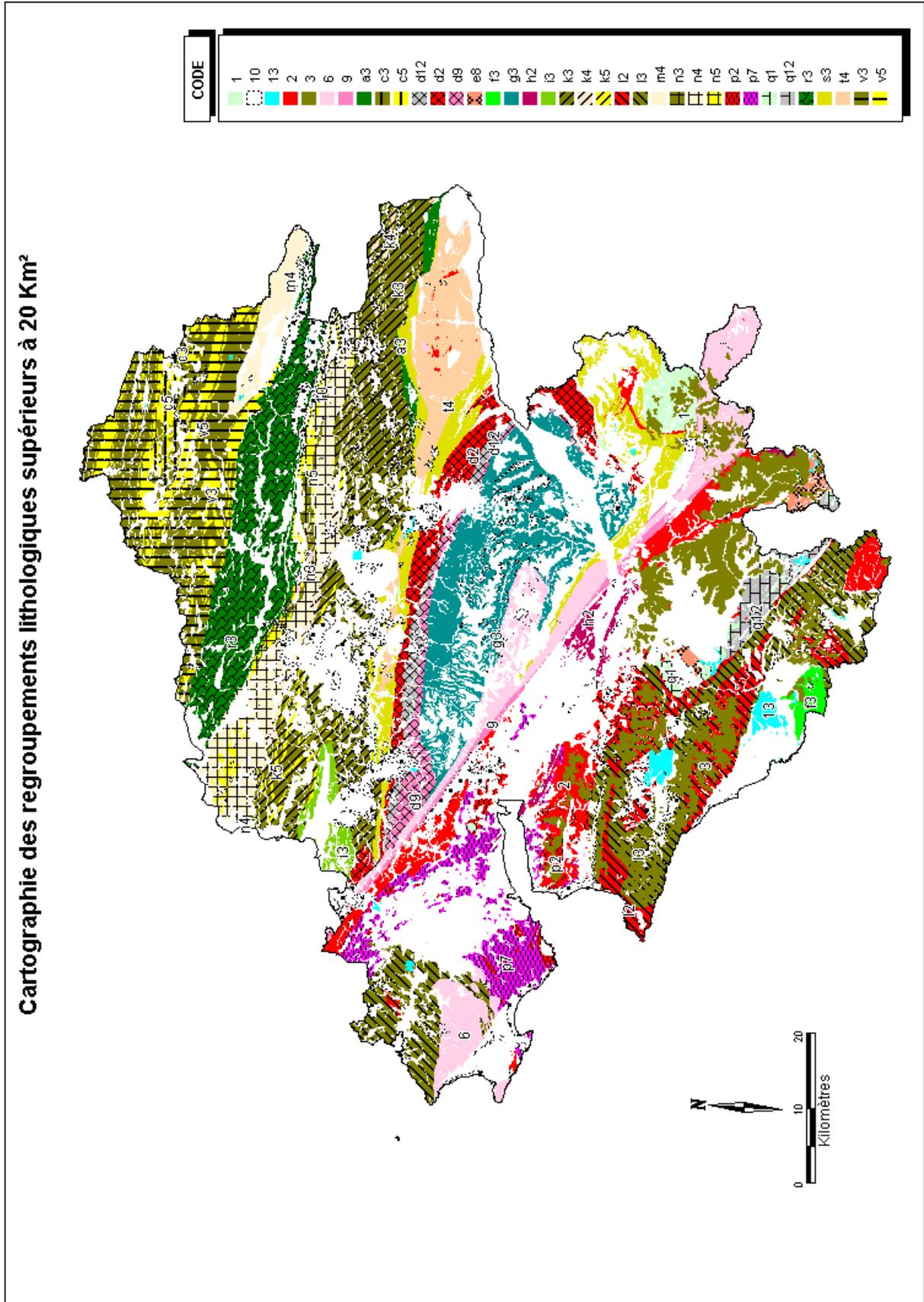


Illustration 13 : Carte des 36 objets géologiques de superficie supérieure à 20 km² retenus pour l'échantillonnage

Conception et réalisation : Benoit Courtais

III.5 - Classes d'hétérogénéité

Les objets géologiques sélectionnés ont ensuite été classés selon cinq degrés d'hétérogénéité vis-à-vis de l'arsenic, du cuivre, du plomb et du zinc. Chaque classification s'est appuyée sur les données statistiques issues de l'inventaire minier national mais aussi sur les informations provenant des recherches bibliographiques. Les classes ainsi établies présentent des recouvrements. Elles ne constituent pas une règle mais des gammes de concentrations et d'écart types illustrant une hétérogénéité notée de 1 à 5 (Tableau 12).

As						
Classe hétérogénéité	Anomalie (teneur, ppm)	Données IMN (ppm)				Note
		Moy	Min	Max	Ecart type	
Très forte	>100	28-46	20	216-1644	37-95	5
Forte	50-100	26-30,5	5-20	118-193	15-29	4
Moyenne	20-50	19-49	5-21	77-109	9,2-19,6	3
Faible	<20	15-32,3	5-20	47-76-(93)	7,8-12,5	2
Très faible		9,7-23,3	5-20	23-56	1,8-6,9-(12,7)	1

Pb						
Classe hétérogénéité	Anomalie (teneur, ppm)	Données IMN (ppm)				Note
		Moy	Min	Max	Ecart type	
Très forte	>500					5
Forte	100-500	32-53	7-22	254-904	21-49	4
Moyenne	60-100	37-48	16-30	122-176	18-24,7	3
Faible	<60	28-40	8-23	84-195	13-16	2
		27-36	10-20	53-72-(99)	9,1-14,6	
Très faible		25-37	13-31	41-66	4,5-9,4	1

Cu						
Classe hétérogénéité	Anomalie (teneur, ppm)	Données IMN (ppm)				Note
		Moy	Min	Max	Ecart type	
Très forte	>500					5
Forte	100-500					4
Moyenne	60-100	17-43	7-19	112-193	22-27	3
Faible	<60	16-36	10-13	84-165	13-17,5	2
		13-41	7-18	64-94	7-13	
Très faible		10,5-20,5		10 15-57	1,7-11	1

Zn						
Classe hétérogénéité	Anomalie (teneur, ppm)	Données IMN (ppm)				Note
		Moy	Min	Max	Ecart type	
Très forte	>1000					5
Forte	300-1000					4
Moyenne	150-300	43;66-80	10-26	(230)-321-434	(36)-41-59	3
Faible	<150	42-99	10-35	179-305	31-55	2
		60-80;111	11-28;55	109-215-(281)	28,6-38,2	
Très faible		34-83;101	10-65	88-160	17,2-26,4	1

Tableau 12 : Détermination des notes d'hétérogénéité par élément à partir des données de l'IMN

L'arsenic est le seul élément pour lequel a été attribuée une note d'hétérogénéité très forte. Malgré les limites de détections de l'arsenic des campagnes d'échantillonnages de l'inventaire minier national élevées (jusqu'à 20 ppm), il apparaît comme l'élément montrant la plus grande variabilité.

La note finale attribuée (Tableau 14, page 39) correspond majoritairement à la note maximale attribuée à l'ensemble des quatre éléments. L'arsenic étant l'élément le plus variable, son influence dans la détermination de la note finale est notable. Compte tenu de la nature géologique des échantillons et des résultats de la recherche bibliographique, quelques réajustements ont été faits.

Ainsi, selon la notation initiale, le groupe des sables (code de regroupement = 10) était qualifié de très hétérogène (note d'hétérogénéité en arsenic = 5). Or, les concentrations moyennes en arsenic, ainsi que l'écart types de ces teneurs étaient faussées par une valeur extrêmement forte (1375 ppm). Seulement 1 % des analyses (sur 385 au total) montrent en fait des anomalies très fortes en arsenic et 2 % sont les témoins d'anomalies fortes (selon les classes définies précédemment, cf. § IV.2). Sur cette base, nous avons diminué cette note à 2.

Au total, trois regroupements ont fait l'objet d'une adaptation de la note d'hétérogénéité (10, note diminuée à 2 ; 6 et d9, notes augmentées à 3).

Parmi les objets géologiques sélectionnés, neuf n'ont pas été échantillonnés lors des campagnes de l'inventaire minier national, car les réflexions préalables relatives à la gîtologie prévisionnelle n'y avait pas noté de potentiel pour qu'elle justifie une exploration minière par voie géochimique. La note d'hétérogénéité a alors été attribuée en fonction du contexte tectonique et du regroupement lithologique.

In fine, six objets ont été définis comme faiblement hétérogènes, vingt comme moyennement hétérogènes, sept apparaissent fortement hétérogènes et trois très fortement hétérogènes. Aucun objet n'apparaît comme très faiblement hétérogène.

L'illustration 14 présente le résultat cartographique de cette analyse de l'hétérogénéité probable des sols du département en fonction du contexte géologique sous-jacent. Les surfaces blanches correspondent aux objets cartographiques non sélectionnés pour l'analyse (§ III.4).

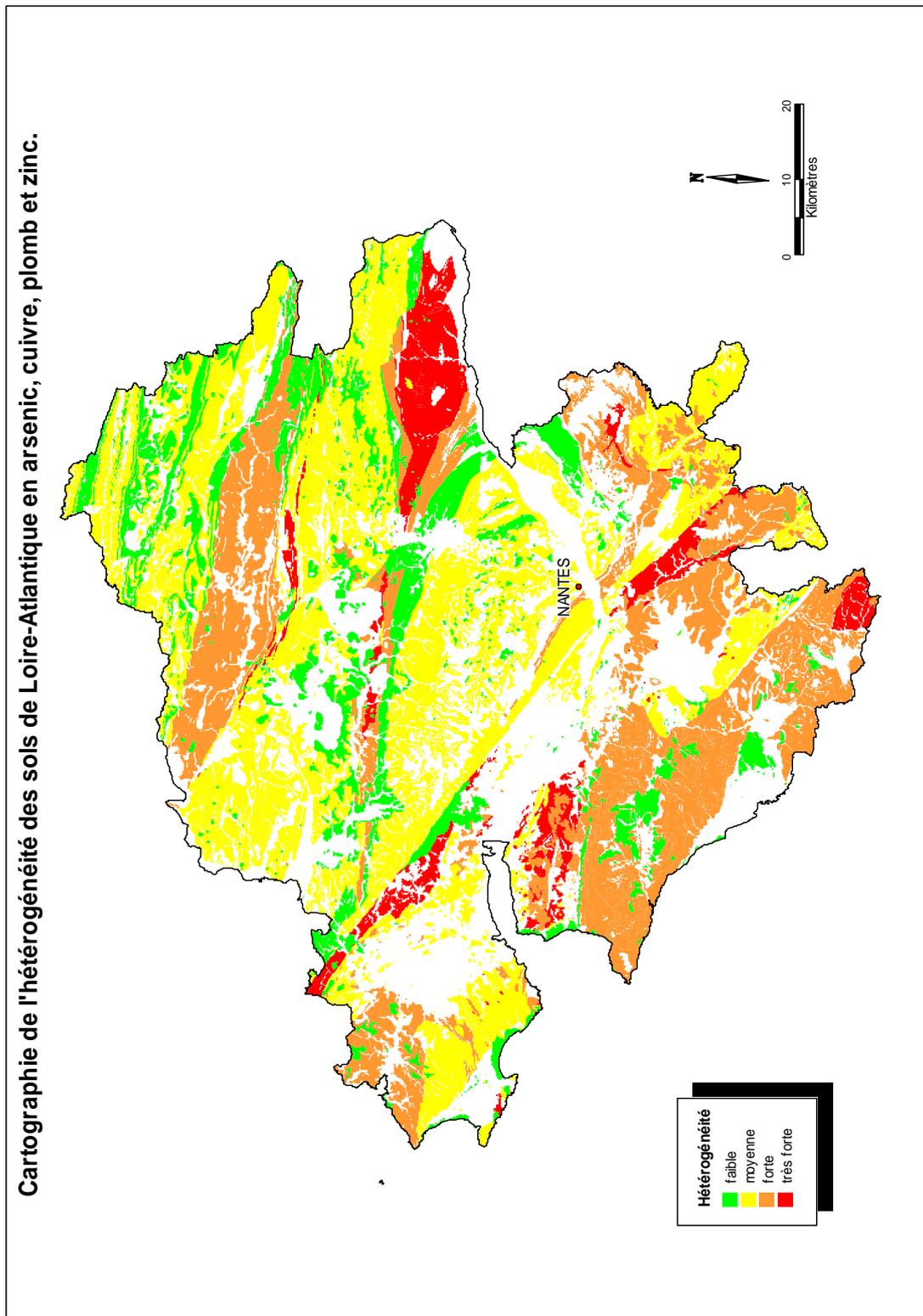


Illustration 14 : Cartographie de l'hétérogénéité géochimique probable des sols de Loire-Atlantique en arsenic, cuivre, plomb et zinc.

III.6 - Densité de points par objet géologique

Aux quatre degrés d'hétérogénéités finalement constatés ont été attribuées quatre densités différentes de points de prélèvement. Les lithologies les plus homogènes seront échantillonnées avec une maille de prélèvement plus large que celle appliquée aux lithologies plus hétérogènes afin de couvrir aux mieux les anomalies géochimiques respectives des différentes formations. Les densités sont présentées sous forme de surfaces ponctuelles, cette surface correspond à l'emprise géographique attribuée à un point de prélèvement.

Le tableau suivant (Tableau 13) présente le nombre d'objets cartographiques présents dans chaque degré d'hétérogénéité ainsi que la surface correspondante, la densité de points de prélèvement proposée et le nombre de points ainsi calculé.

Hétérogénéité	Nombre d'objets géologiques	Surface totale (km ²)	Maille de prélèvement (km ²)	Nombre total de points
faible	6	732,5	25	29
modérée	20	2014,6	16	126
forte	7	1404,6	12	117
très forte	3	374,3	9	42

Tableau 13 : Détermination des mailles de prélèvement par objet géologique en fonction des classes d'hétérogénéité

Cette méthode systématique conduit à 314 points de prélèvement. L'objectif initial étant 350 points, il reste alors 36 points de vérification ou de complément. L'attribution du nombre d'échantillons a été purement mathématique. L'inconvénient majeur de cette méthode est que peu de points ont été attribués aux petites surfaces à forte hétérogénéité (Tableau 14, exemple des schistes de l'unité de Saint-Mars-la-Jaille, 2 échantillons pour une surface totale de 20,1 km²). Dans ces cas particuliers, des points de prélèvements supplémentaires seront positionnés pour affiner la connaissance de ces surfaces réduites, mais à forte hétérogénéité.

CODE	Surface (Km ²)	Note d'hétérogénéité	Nombre de prélèvements
10	381,6	2	15
13	39,8	2	2
a3	22,9	2	1
d2	126,2	2	5
v5	140,2	2	6
c5	21,8	2	1
6	258,1	3	16
d12	38,7	3	2
d9	59,3	3	4
g3	300,4	3	19
h2	32,1	3	2
i3	29,4	3	2
k3	372,4	3	23
k4	28,2	3	2
k5	22,8	3	1
n4	171	3	11
n5	39,9	3	2
p7	136,6	3	9
v3	285	3	18
c3	20,2	3	1
9	35,2	3	2
m4	55,8	3	3
q12	42,2	3	3
1	45	3	3
q1	21,5	3	1
e8	20,8	3	1
3	392	4	33
l2	155,5	4	13
l3	287,4	4	24
p2	39	4	3
r3	311,4	4	26
s3	197,1	4	16
f3	22,2	4	2
2	178,1	5	20
n3	20,1	5	2
t4	176,1	5	20
TOTAL	4526 Km²		314

Tableau 14 : Nombre prévisionnel de points de prélèvement calculé par objet géologique sélectionné (identifié par son code).

III.7 - Positionnement des points de mesures

Le positionnement des points de mesure s'est appuyé sur la méthode de l'échantillonnage systématique stratifié en plan. Ce type d'échantillonnage, créé pour l'étude des sites pollués, nécessite ici d'être adapté. **Pour s'extraire des influences anthropiques, il apparaît préférable de réaliser les prélèvements en domaine forestier.** Le lieu de prélèvement doit être choisi, et ne peut donc être systématique. De ce modèle a été conservé le concept de maille propre à chaque zone échantillonnée. Les dimensions des mailles utilisées sont fonctions de l'hétérogénéité des objets géologiques cartographiques.

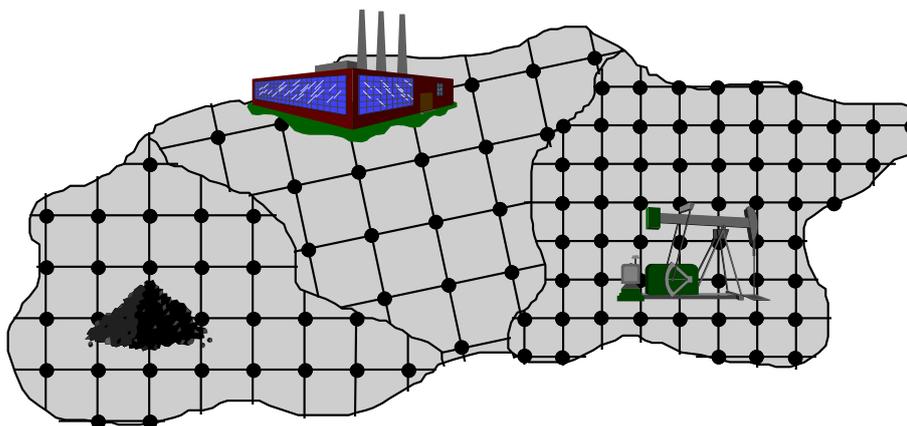


Illustration 15 : Echantillonnage systématique stratifié en plan (CNRSSP 2006, d'après Wavrer, 1997)

Un maillage de taille variable a été créé pour chaque regroupement lithologique :

- 5 km de côté pour les objets d'hétérogénéité faible ;
- 4 km de côté pour les objets d'hétérogénéité modérée ;
- 3,46 km de côté pour les objets d'hétérogénéité forte ;
- 3 km de côté pour les objets d'hétérogénéité très forte.

L'illustration 16 représente la répartition de ces différentes mailles. Compte tenu qu'une maille ne recouvre pas un seul objet cartographique mais plusieurs, celles-ci se chevauchent. Il est par conséquent indispensable de procéder objet par objet.

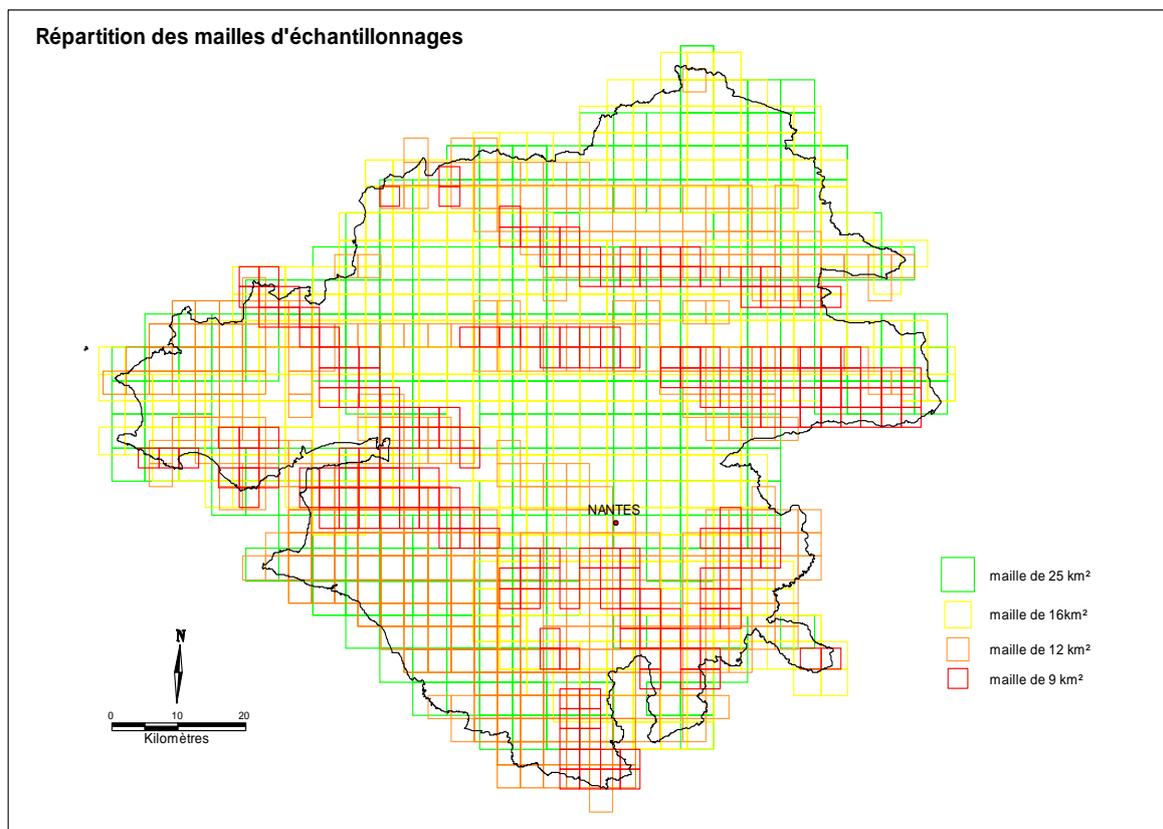


Illustration 16 : Schéma de répartition des mailles d'échantillonnage.

L'illustration 17 présente l'exemple de l'objet cartographique t4. Les lithologies gréseuses du bassin d'Ancenis sont très fortement hétérogènes (note 5). Elles seront échantillonnées avec un total de 20 prélèvements. L'ensemble des points a été placé à l'aide des cartes topographiques IGN, échelle 1/25 000.

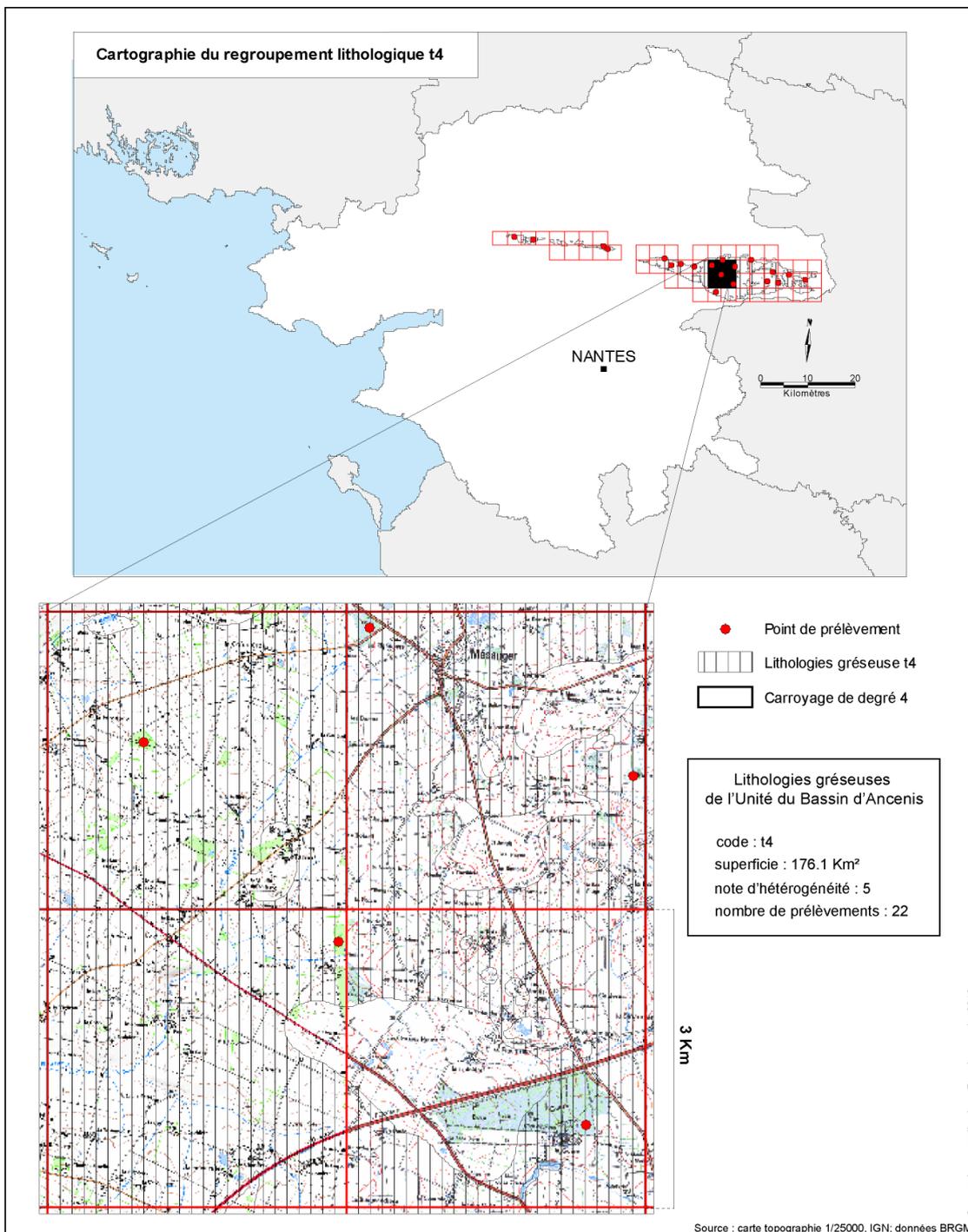


Illustration 17 : Exemple de positionnement de points de prélèvement, lithologies gréseuses de l'Unité du bassin d'Ancenis t4.

Le maillage de 9 km² ne correspondant pas entièrement aux contours géologiques, le quadrillage a servi de guide pour placer les points de prélèvement de la façon la plus régulière possible (un ou deux prélèvements par maille).

Plus de 300 forêts, bosquets ou autres zones boisées de plus de 3,6 km² ont ainsi été sélectionnés à travers le département et validés par photo aérienne. L'illustration 18 présente la localisation des 314 points de prélèvements envisagés.

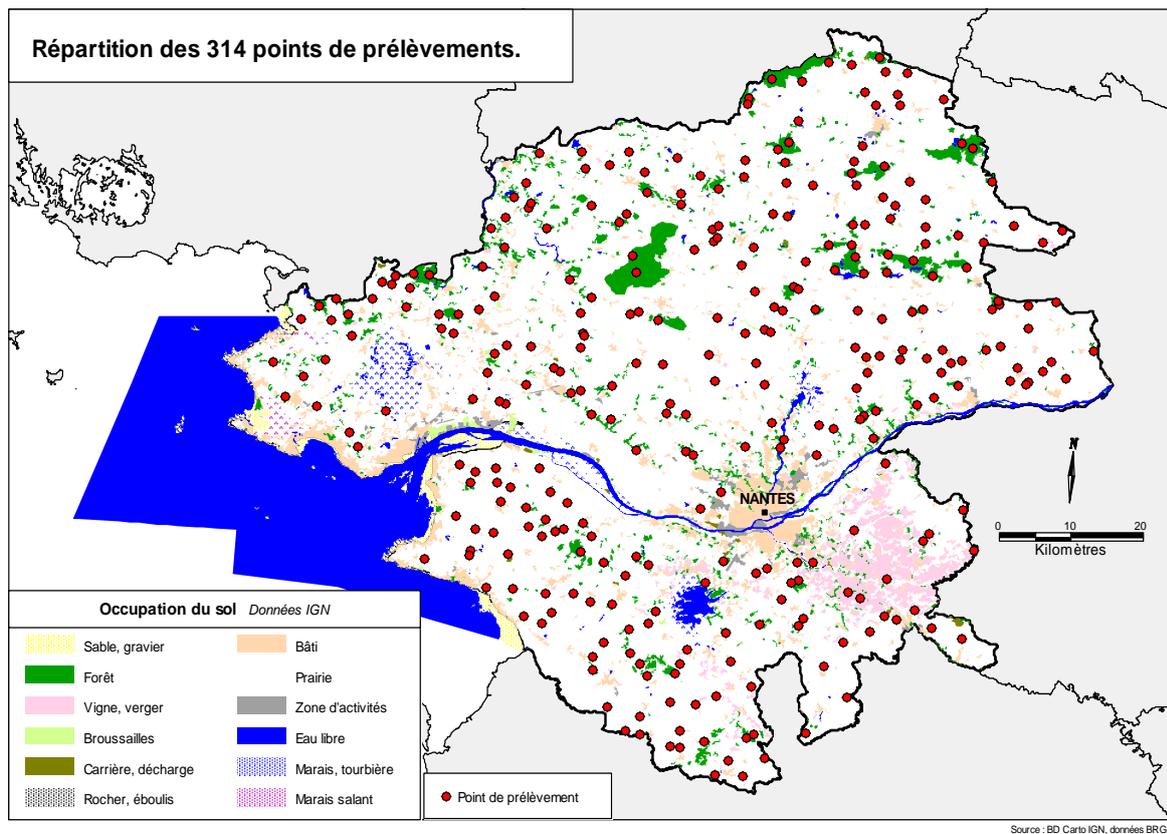


Illustration 18 : Positionnement des 314 prélèvements de sols envisagés.

La principale difficulté rencontrée a été l'attribution des points de prélèvements dans le sud-est du département. Comme vu précédemment, la forte activité viticole et arboricole (en rose sur la carte) est une importante contrainte dans le positionnement des points d'analyses. Afin de conserver la distance de 100 mètres entre les vignes et le prélèvement, certains points ont dû être positionnés dans des bois de taille inférieure à 3,6 km².

III.8 - Positionnement des points de mesures complémentaires

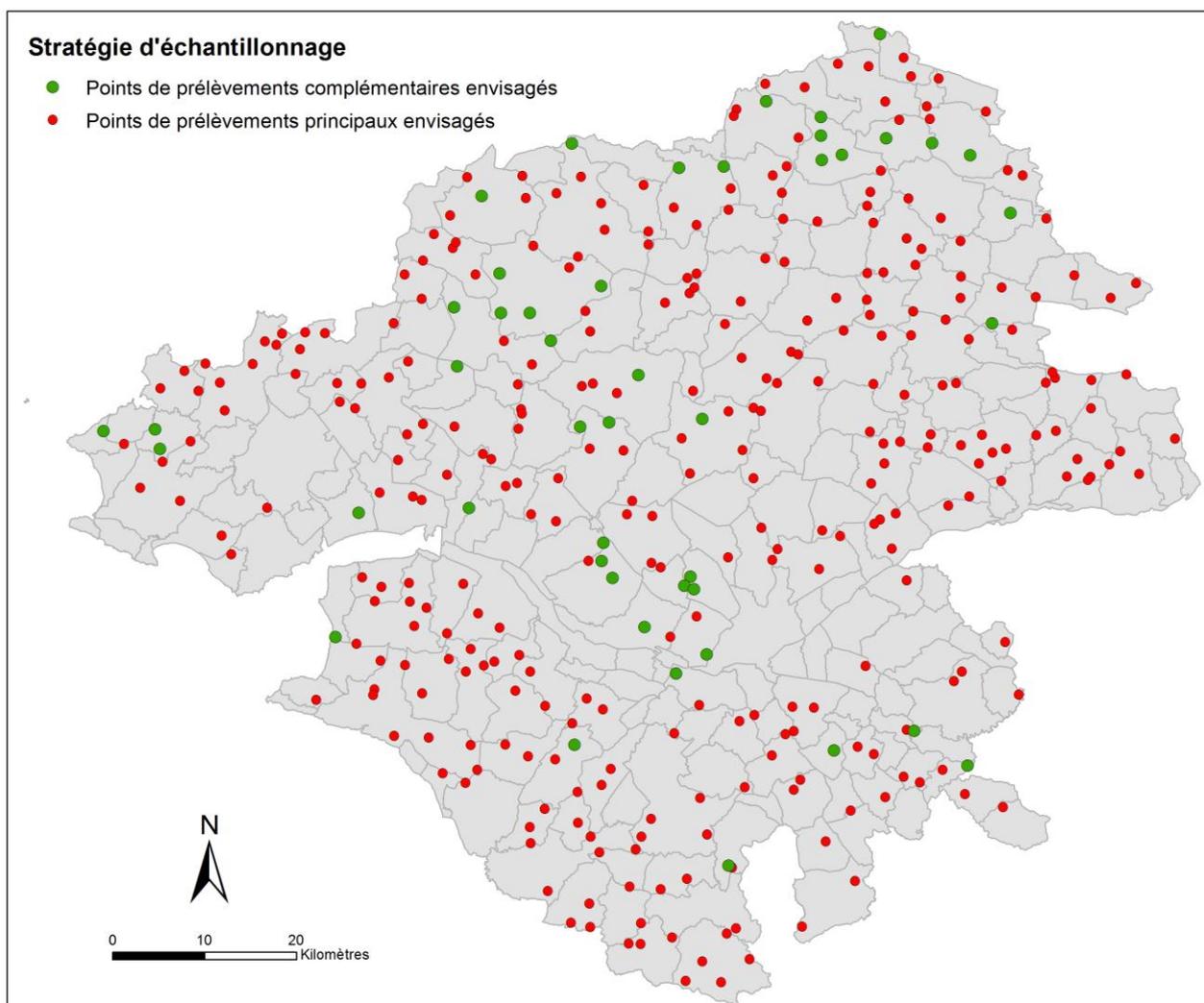


Illustration 19 – Positionnement des points de prélèvement complémentaires

IV - Campagnes de prélèvement et d'analyse

IV.1 - Protocoles

IV.1.1 - Echantillonnage

Afin de s'affranchir le plus possible d'une influence anthropique, les échantillons de sol ont été prélevés dans des forêts. Réalisés à la main à l'aide d'une tarière hélicoïdale après avoir enlevé la litière et l'humus (horizon A0) à la truelle, les prélèvements ciblent les sols superficiels (0-20 cm). Chaque échantillon correspond à quatre prélèvements, généralement répartis sur un carré de 10 à 25 m de côté, ou parfois alignés selon l'accessibilité.

Les principales périodes d'échantillonnage ont été l'été 2010, le printemps, l'été et l'automne 2011, ainsi que le printemps et l'été 2012.

IV.1.2 - Préparation des échantillons

Une fois prélevés, les échantillons ont été homogénéisés au laboratoire, puis émottés à la main et quartés avant d'être séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm (Illustration 20).

Étape	Description	Photos
<u>Démottage</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Fragmentation de l'échantillon pour raccourcir le temps de séchage ; - Morceaux trop gros et solidaires (ex : argiles) affinés en morceaux de 2 à 3 cm de côté. 	
<u>Quartage</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Homogénéisation de l'échantillon ; - Séparation en 4 pour permettre une phase de séchage moins longue si les échantillons prélevés sont trop volumineux. 	
<u>Séchage</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Dans une pièce fermée sans apport extérieur pour éviter toute contamination ; - A température ambiante. 	
<u>Broyage</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Avec mortier de laboratoire ; - Systématique, encore plus s'il y a une importante proportion d'argile (sec très dur). 	
<u>Tamissage</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Dernière étape avant analyse de l'échantillon ; - A l'aide d'un tamis de maille 2 mm pour récupérer la partie la plus fine (selon protocole analytique), pour analyse. 	

Illustration 20 – Synthèse des étapes de préparation des échantillons

IV.1.3 - Analyses

La fraction inférieure à 2 mm a été analysée par fluorescence X, à l'aide d'un appareil portable de type NITON (XRF Niton Xlt 792). Chaque analyse dure 2 minutes, chaque échantillon étant analysé au moins deux fois.

Les valeurs mesurées par ce type d'équipement, sur des échantillons tamisés à 2 mm, permettent d'obtenir une bonne estimation des teneurs réelles, mais elles peuvent être perturbées par la présence d'autres éléments (constituants dans l'échantillon mesuré donnant un effet de matrice). Il est donc important de vérifier et éventuellement corriger cet effet grâce à des analyses de contrôle, effectuées par un équipement de précision (ICP) selon un protocole normalisé.

Treize échantillons ont été analysés par ICP-AES afin de corriger les valeurs acquises au NITON. Préalablement aux analyses par ICP-AES (JY166), les échantillons de sols (fraction < 2 mm analysée au NITON) sont dissouts par une succession d'attaques acides selon les normes NF ISO 11464, NFX 31-147, XP 33-012.

Les droites de régression obtenues entre analyses ICP et NITON sont proposées dans l'illustration 21. Les équations de corrélation linéaire correspondantes sont les suivantes :

$$\text{As ICP} = \text{As Niton} / 0,82$$

$$\text{Pb ICP} = \text{Pb Niton} / 0,98$$

$$\text{Zn ICP} = \text{Zn Niton} / 0,67$$

$$\text{Cu ICP} = \text{Cu Niton} / 0,97$$

On note ainsi une excellente corrélation entre les teneurs mesurées au NITON et les teneurs obtenues par ICP. Des teneurs équivalentes sont obtenues pour le Pb et le Cu. Pour l'As et le Zn, le NITON utilisé semble sous-estimer les teneurs. Les résultats présentés dans la suite du rapport correspondent aux teneurs NITON corrigées à partir de ces droites de régression avec l'ICP.

Pour un ensemble d'échantillons, le contenu en élément trace s'est révélé inférieur au seuil de détection du NITON. Par défaut, une teneur correspondant à l'erreur indiquée par le NITON a été attribuée à ces échantillons. Les limites de détection corrigées du NITON Xlt792 sur les analyses réalisées sont de l'ordre de 6 à 13 mg/kg pour l'As, 7 à 10 mg/kg pour le Pb, 14 à 20 mg/kg pour le Zn et 17 à 27 mg/kg pour le Cu.

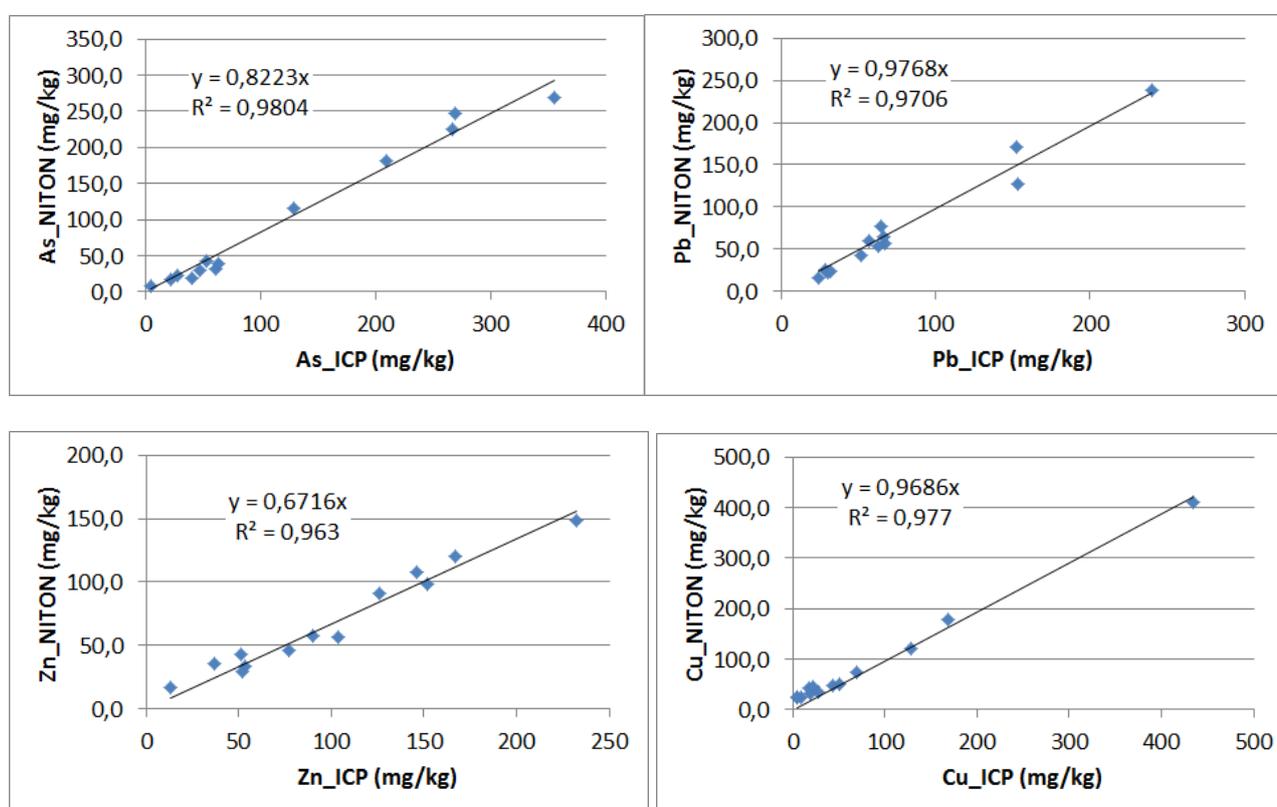


Illustration 21 – Corrélation entre les analyses au NITON et les analyses par ICP-AES ou MS

IV.2 - Gestion des données

Les données acquises (localisation des points d'échantillonnage, description des échantillons et de leurs contextes, résultats d'analyse, etc.) ont été saisis dans une base de données géo-référencées sous Access. Les résultats d'analyse ont été traités de manière statistique (Xlstat) et spatiale (ArcGis 10). Le logiciel ArcGis a été utilisé en amont pour positionner les points de prélèvements, et préparer les cartes pour le terrain.

IV.3 - Difficultés rencontrées

Deux difficultés principales ont été rencontrées :

- des enrichissements très ponctuels liés à des filons/veines dans plusieurs roches de socle,
- une représentation absente ou inexacte des formations superficielles sur les cartes géologiques.

a) Les filons/veines sont difficiles à cartographier, de même que les anomalies géochimiques des sols développés sur de tels filons. Pour identifier ces enrichissements ponctuels, une très importante densité de points d'échantillonnage serait nécessaire, comme cela est utilisé en prospection minière.

Une telle densité de données existe sur certains secteurs de la Loire-Atlantique grâce à l'inventaire minier (cf. § IV.1). Toutefois, il s'agit d'analyse de sédiments ou de sols et les valeurs ne peuvent pas toujours être considérées comme du fond pédo-géochimique, soit à cause d'une influence anthropique, soit à cause de la nature de l'échantillon (sédiment ou sol) et du mode de préparation (broyage-tamisage à 0,125 µm versus tamisage à 2 mm).

Les tests méthodologiques réalisés précédemment sur plus de 100 échantillons ont montré qu'environ un tiers des valeurs était très différent entre les résultats de l'inventaire minier et les prélèvements au Niton, avec un écart de plus de 20 % entre les résultats analytiques d'échantillons pourtant très proches (Le Guern *et al.*, 2007, 2010). Seulement une partie des différences pouvait s'expliquer par une hétérogénéité liée à la présence de filons.

Toutefois, en prenant des précautions, les résultats de l'inventaire minier peuvent donner une idée du fond pédo-géochimique (absence d'enrichissement, degré d'enrichissement). Il est difficile cependant d'utiliser ces données pour créer des cartes de référence du fond géochimique des sols. En particulier, les classes d'anomalie définies ne peuvent pas être utilisées telles quelles.

b) L'absence ou le manque de représentation de formations superficielles sur les cartes géologiques a été problématique. En particulier, la signature géochimique des formations géologiques allochtones (comme les limons des plateaux et les sables éoliens) est très différente de la signature des roches de socle. Ces formations loessiques superficielles sont généralement très pauvres en métaux de base, du fait de leur mode de dépôt. Il est par conséquent difficile d'interpoler les résultats obtenus sur les sols. Ces difficultés ont conduit à s'intéresser plus particulièrement aux formations superficielles allochtones (nature, définition, présence en Loire-Atlantique) et à comparer leur répartition entre les cartes géologiques et pédologiques de Loire-Atlantique. Le travail correspondant est présenté en Annexe 6.

Les essais pour trouver des critères (analyse géomorphologique, géologique, ...) pour aider à cartographier ces formations superficielles se sont avérés infructueux. Aucune méthodologie simple, hormis l'observation *de visu* lors des cartographies directes sur le terrain, ne semble applicable ; on s'est heurté à un manque de levés cartographiques sur les cartes géologiques de ce département et à un manque de méthodologie pour les appréhender à partir des jeux de données numériques. Une piste de développement méthodologique a été identifiée (Annexe 6). Elle n'a cependant pas pu être explorée plus en avant dans le cadre de ce projet.

Pour prendre en compte le manque de connaissance sur l'extension des formations superficielles allochtones, le protocole d'échantillonnage a été adapté. Il inclut notamment une description du profil pédologique, et une description de la texture des sols (proportions d'argile, limon, sable). Les informations correspondantes ont été saisies dans la base de données. Les descriptions générales des sols de Loire-Atlantique développés sur roche de socle (cf. Annexe 6) ont été utilisées également.

En complément des éléments descriptifs précédents, et notamment du profil, il serait intéressant de passer en revue au laboratoire les échantillons de sol (fraction < 2 mm et fraction > 2 mm) pour vérifier s'ils dérivent de la roche mère de socle, ou de formations superficielles allochtones, cartographiées ou non sur les cartes géologiques. Des premiers essais en ce sens semblent prometteurs.

V - Résultats et interprétation

Les classes d'anomalie définies précédemment pour chaque élément (cf. § IV.2) (*pas d'anomalie, anomalie modérée, forte, très forte*) ont été utilisées. Elles sont rappelées ci-dessous pour mémoire.

	Anomalie	As	Pb	Zn	Cu
	Aucune	≤ 25	≤ 60	≤ 100	≤ 20
	Modérée	25-50	60-100	100-250	20-60
	Forte	50-100	100-500	250-1000	60-100
	Très forte	> 100	> 500	> 1000	> 100

Tableau 15 : Classes d'anomalie pour les teneurs en éléments traces (mg/kg) dans les sols (s'appuyant sur les résultats de Baize, 2000, 2004, 2008)

V.1 - Données brutes

V.1.1 - Approche statistique

a) Données METOTRASS

Les échantillons de sol prélevés dans le cadre du programme METOTRASS montrent des teneurs en éléments traces s'étendant de 9 à 318 mg/kg pour As, de moins de 11 mg/kg à 108 mg/kg pour Pb. Cette forte variabilité, plus marquée pour As que pour Pb, apparaît principalement liée à la présence de filons minéralisés. Les teneurs en Zn vont de 18 à 163 mg/kg, et celles de Cu de moins de 18 à 185 mg/kg.

Comme le montre l'illustration 23, la répartition des teneurs selon les classes d'anomalie montrent que la fréquence d'anomalies fortes à très fortes est plus marquée pour As : 1,3 % des échantillons présentent une anomalie forte, 3 % une anomalie très forte. Par importance décroissante viennent ensuite Cu (anomalie très forte : 0,8 %, anomalie forte : 8 %) puis Pb (anomalie forte : 0,5 %). Aucune anomalie forte à très forte de Zn n'a été rencontrée. La forte proportion d'anomalies modérées pour le Cu correspond en fait à un artefact lié à la limite de détection de l'appareil, qui se situe entre 17 et 27 mg/kg.

L'analyse statistique permet de constater que plus de 85% des échantillons des sols prélevés ne présentent pas d'anomalie en As, Pb et Zn, ou présentent une anomalie très modérée pour le Cu. Il semble ainsi que les roches de socle sur lesquelles se sont développés les sols ont généralement des concentrations faibles dans ces éléments traces, sauf localement où elles sont affectées par des filons, failles ou de l'hydrothermalisme, ou une action anthropique. L'analyse cartographique permettra de vérifier le lien entre les anomalies dans les sols et les filons ou accidents tectoniques.

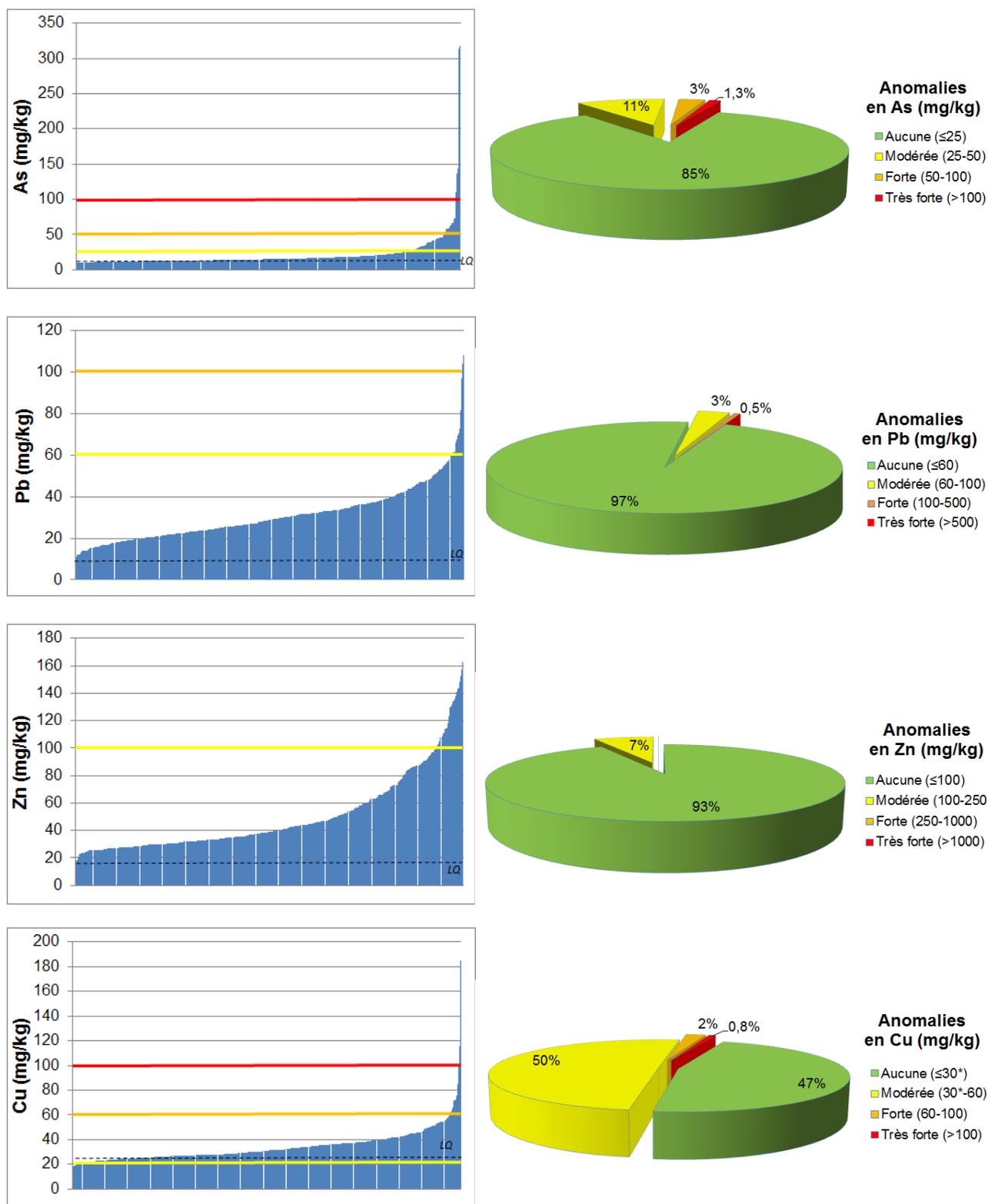


Illustration 22 : Distribution des teneurs en As, Pb, Zn, Cu mesurées dans les sols développés sur roche de socle, prélevés dans le département de la Loire-Atlantique dans le cadre du programme METOTRASS (LQ : limite de quantification)

b) Données METOTRASS + étude test 2006

Les résultats présentés et discutés dans ce paragraphe incluent les données acquises dans cette étude ainsi que les données acquises lors de la phase de test (Le Guern *et al.*, 2007). Dans cette dernière, plus de

100 échantillons de sol avaient été prélevés sur 3 zones connues pour présenter des concentrations significatives en As ou Pb, et une zone connue pour l'absence d'enrichissement particulier.

La prise en compte de l'ensemble des données (METOTRASS + étude 2006) conduit à des teneurs maximales plus élevées (380 mg/kg pour As, 244 mg/kg pour Pb, 221 mg/kg pour Zn et 423 mg/kg pour Cu) et une augmentation des proportions d'échantillons à anomalie forte ou très forte, comme le montre l'illustration 23.

Comme observé précédemment, il apparaît que la majorité des échantillons ne présente pas d'anomalie en éléments traces, ce qui reflète le faible enrichissement des roches de socle sous-jacente, et/ou des formations superficielles non cartographiées.

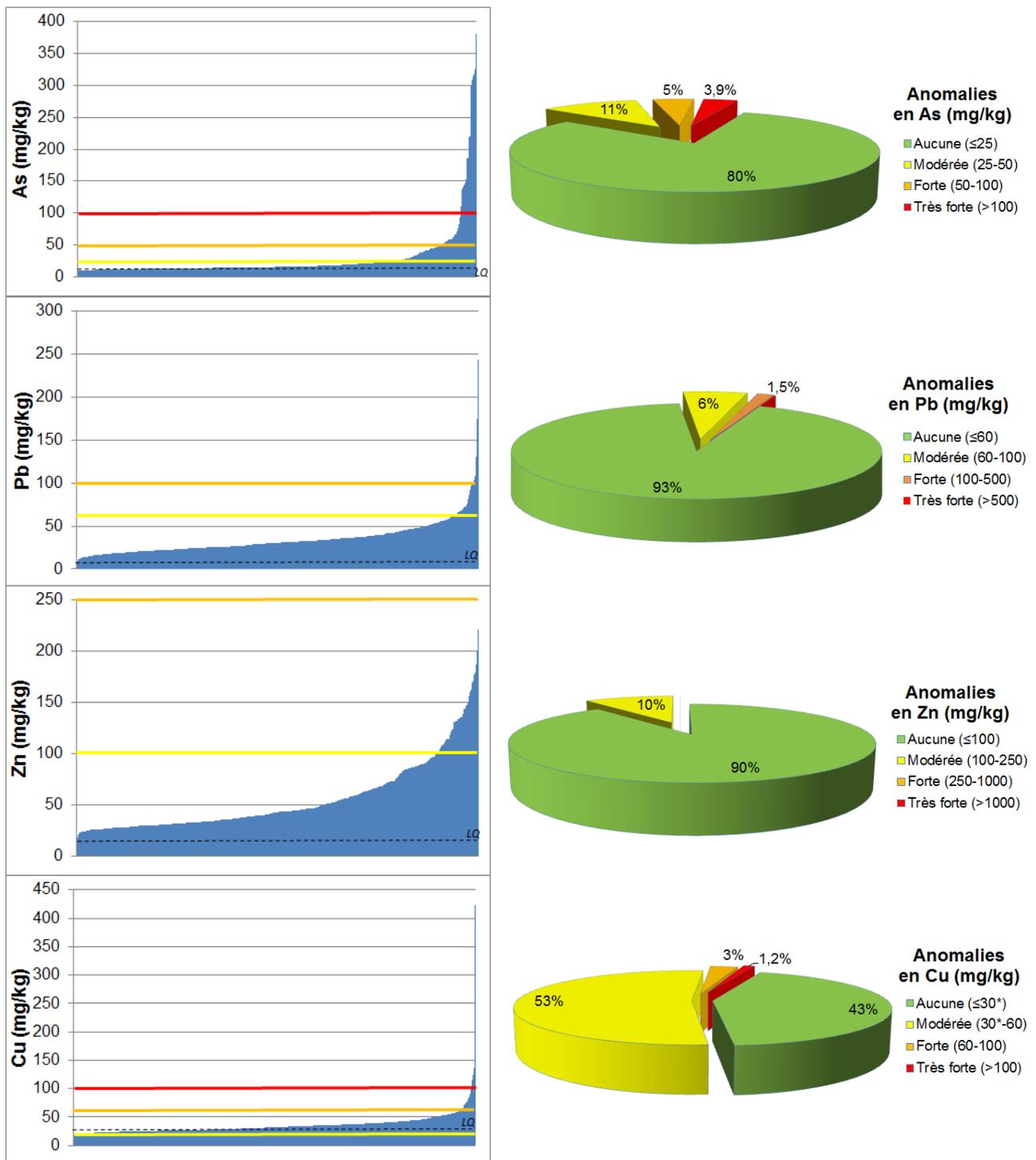


Illustration 23 : Distribution des teneurs en As, Pb, Zn, Cu mesurées dans les sols développés sur roche de socle, prélevés dans le département de la Loire-Atlantique

V.1.2 - Distribution spatiale

Les cartes ci-dessous (Illustration 24 à Illustration 27) représentent, selon les classes d'anomalie définies, les teneurs en As, Pb, Zn et Cu des échantillons de sol prélevés dans le cadre de la présente étude (METOTRASS). Les illustrations 24 à Illustration 31 intègrent aussi les données de la phase 1 (étude 2006). Elles précisent également les échantillons pour lesquels les teneurs sont inférieures à la limite de quantification de l'appareil.

a) Données METOTRASS

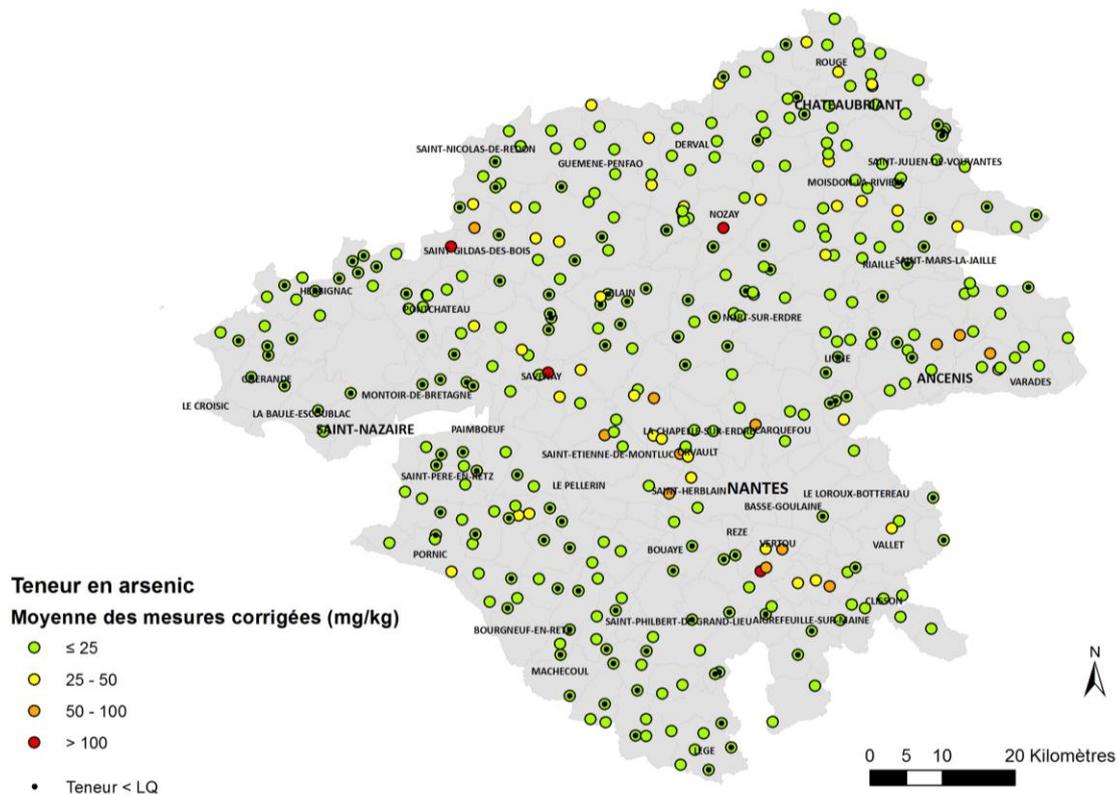


Illustration 24 : Teneurs en As des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

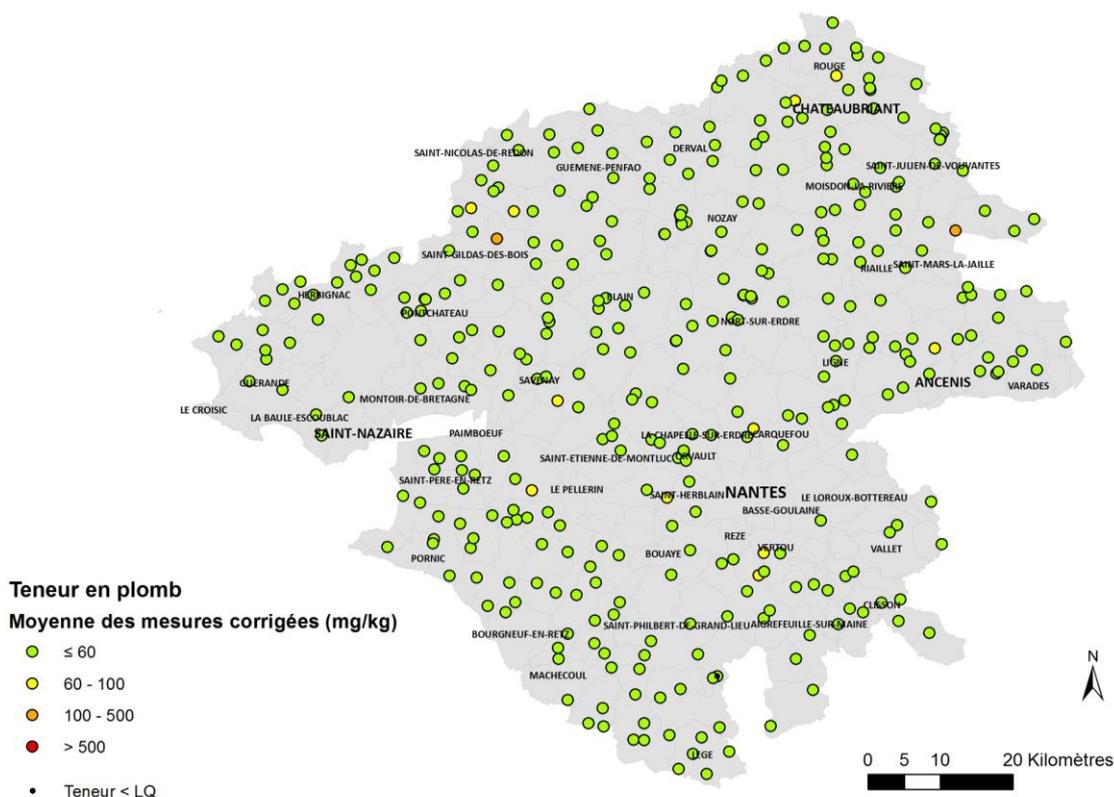


Illustration 25 : Teneurs en Pb des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

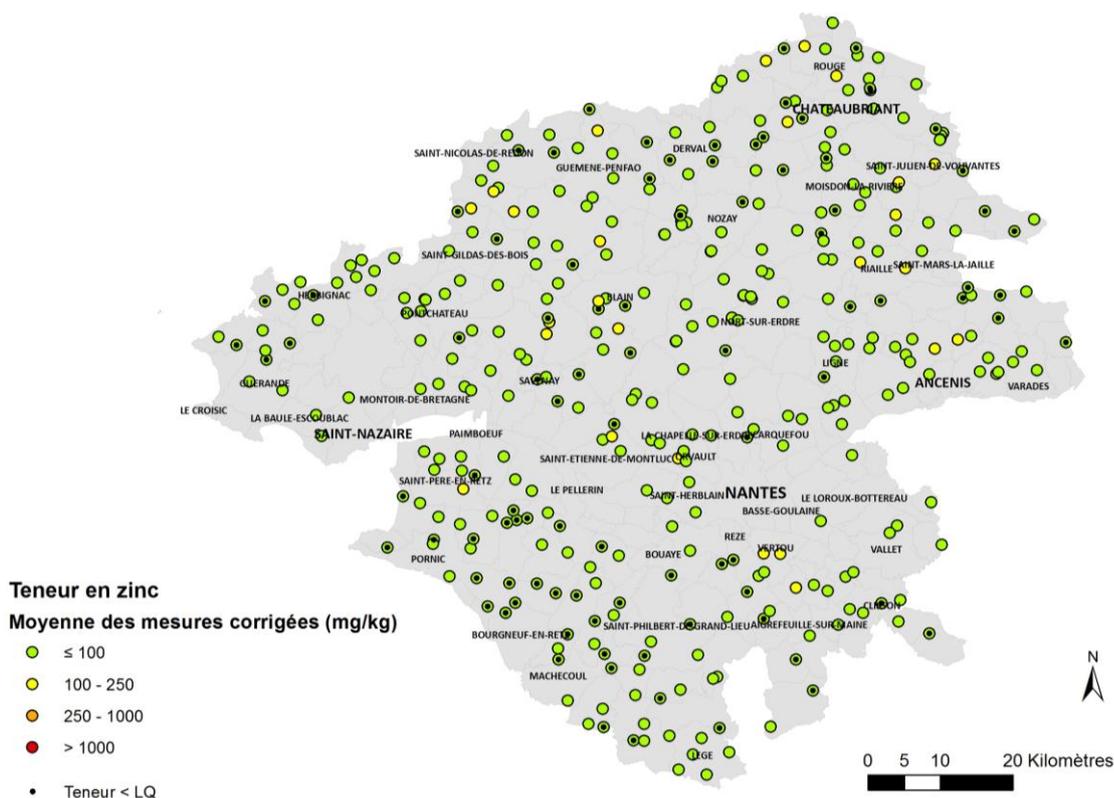


Illustration 26 : Teneurs en Zn des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

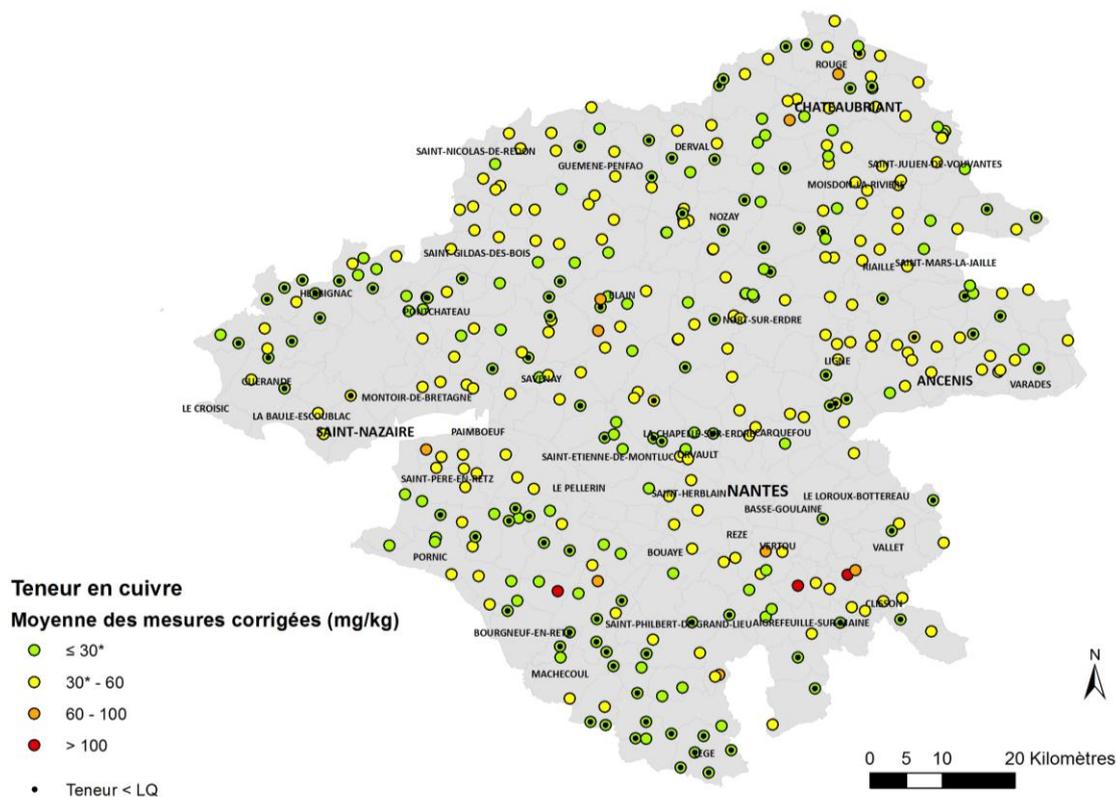


Illustration 27 : Teneurs en Cu des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

b) Données METOTRASS + étude test 2006

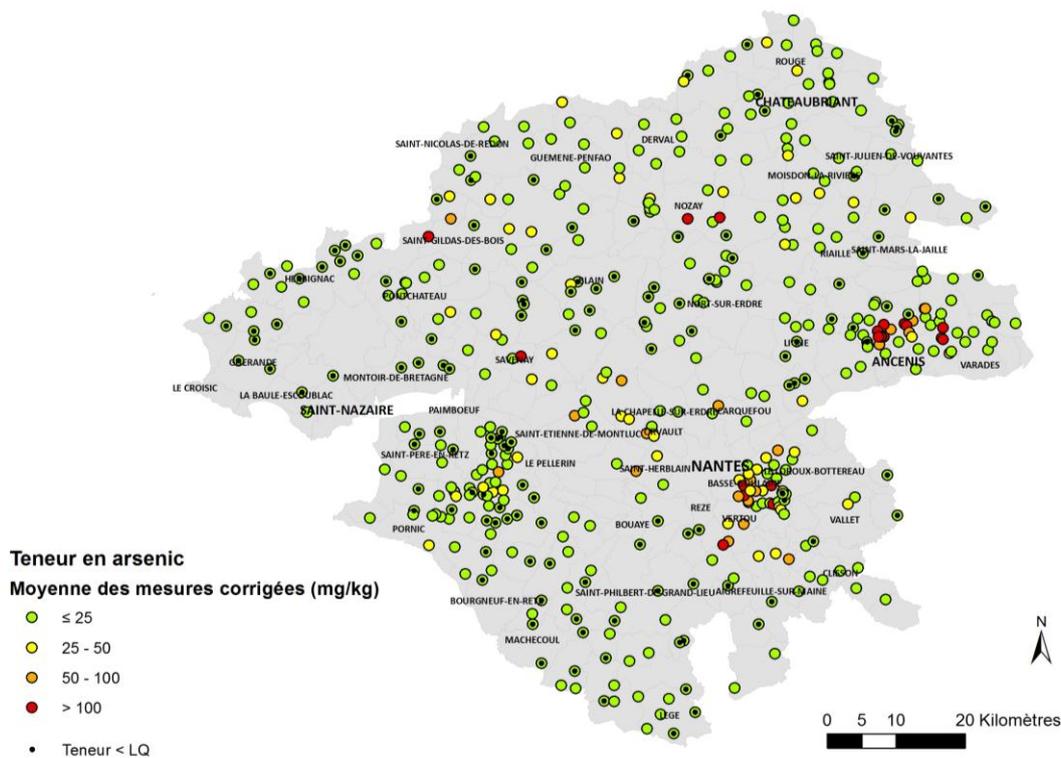


Illustration 28 : Teneurs en As des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

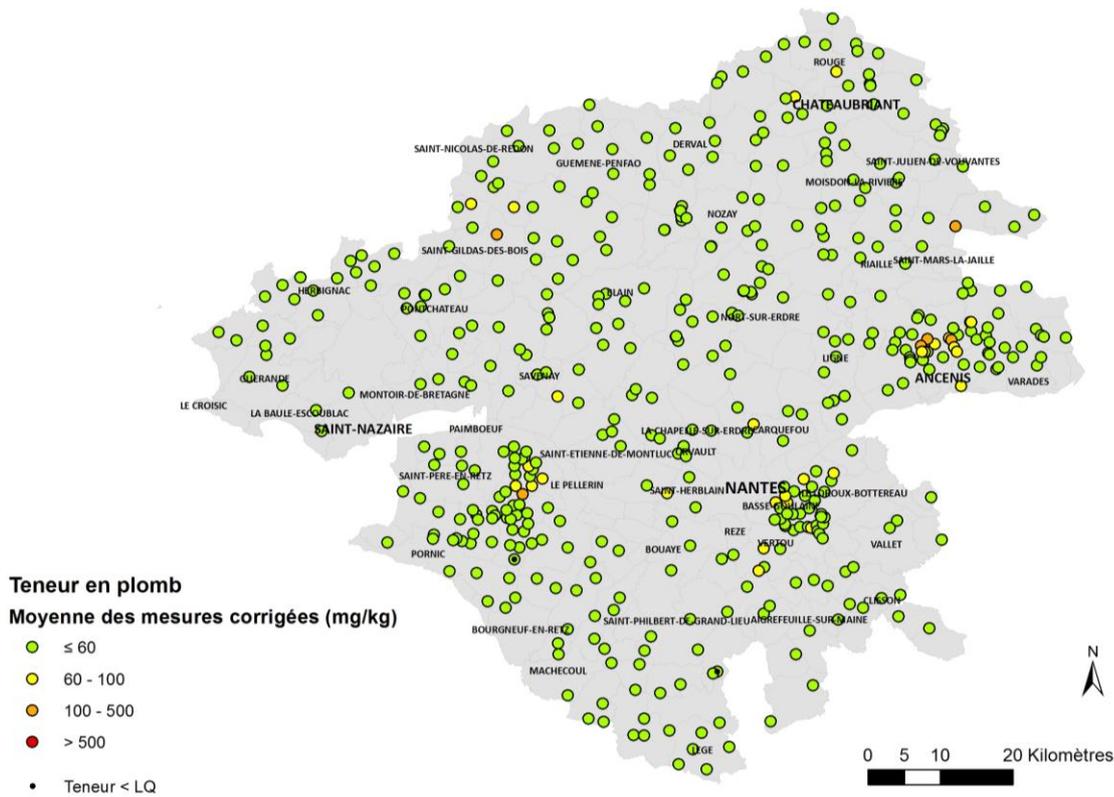


Illustration 29 : Teneurs en Pb des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

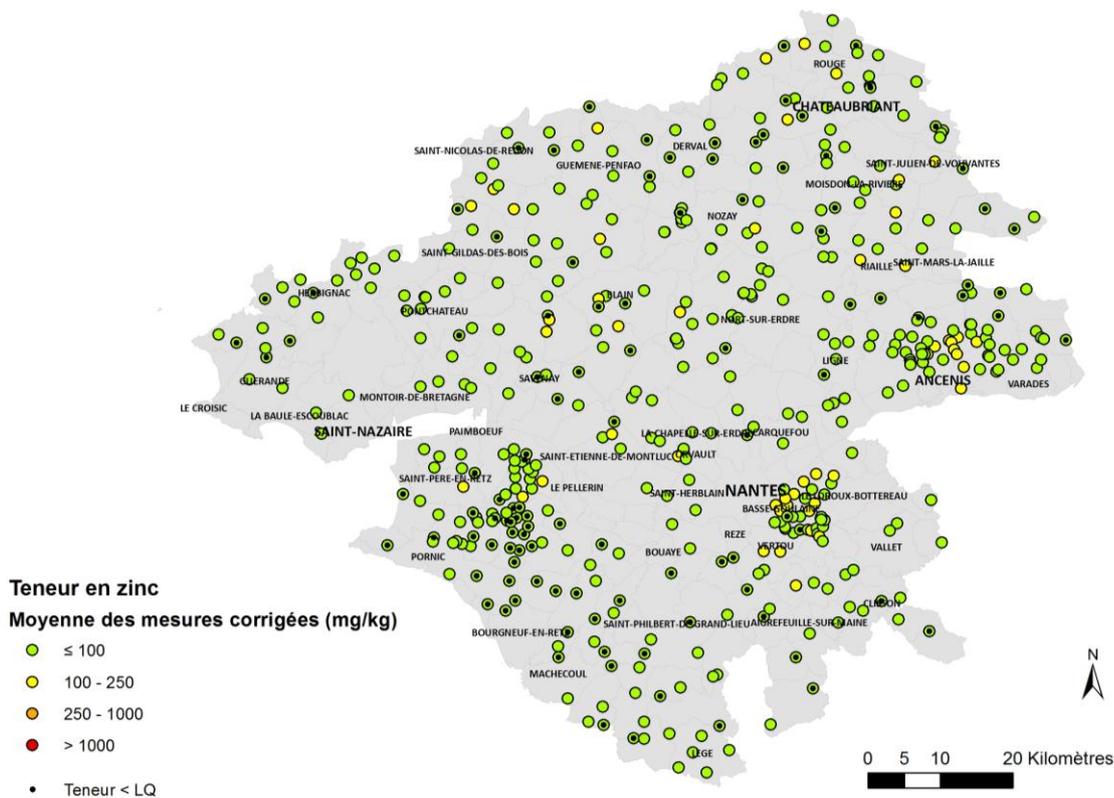


Illustration 30 : Teneurs en Zn des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

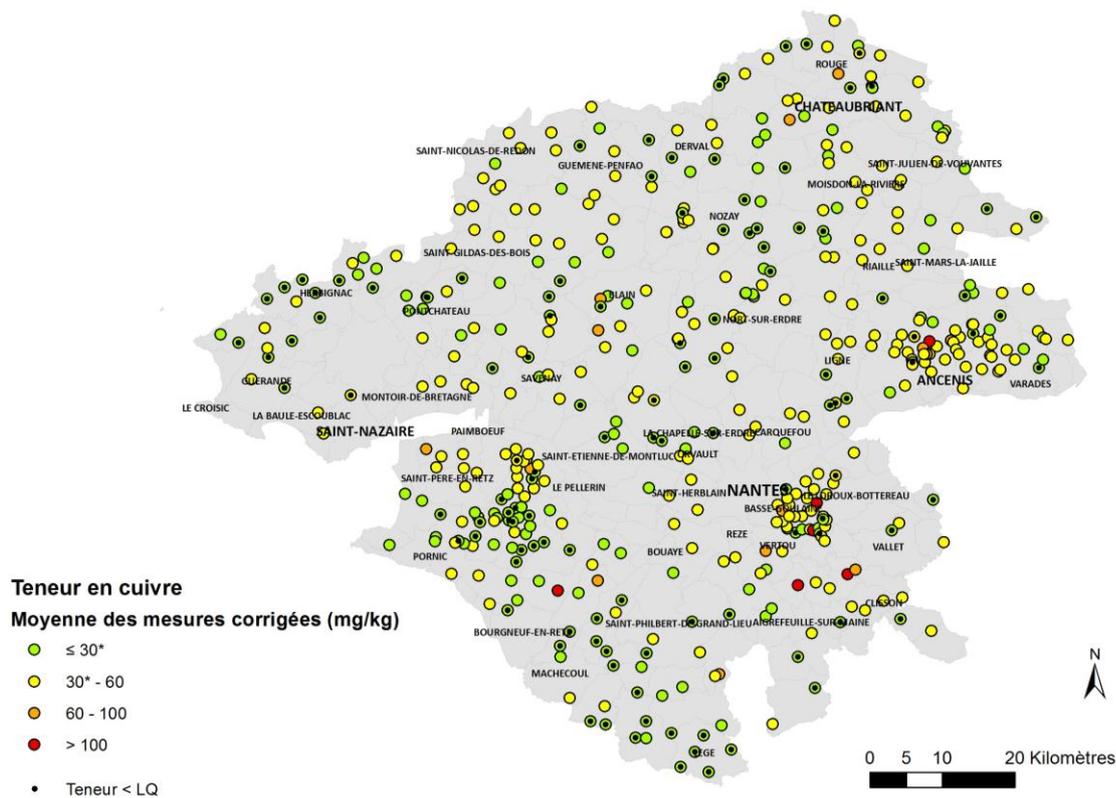


Illustration 31 : Teneurs en Cu des échantillons de sol prélevés dans le cadre du projet METOTRASS et de la phase 1 de test (2006), en fonction des classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

Dans l'ensemble, les nuages de points apparaissent difficiles à interpréter, les anomalies semblant réparties sur l'ensemble du département. La représentation spatiale des teneurs moyennes par objet géologique et des proportions d'anomalies fortes ou très fortes devrait permettre de préciser l'interprétation des données. L'ajout des données de la phase 1 de test (2006) met en avant de plus nombreuses anomalies très fortes, en particulier pour l'arsenic. Ceci s'explique par les objectifs de la phase 1 qui ciblait plus spécifiquement des secteurs d'anomalie connus grâce aux données de l'IMN.

V.1.3 - Comparaison de l'hétérogénéité constatée par rapport à l'hétérogénéité estimée *a priori*

La comparaison de l'hétérogénéité constatée par rapport à l'hétérogénéité estimée permet de vérifier la pertinence de la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre. Même si le nombre d'échantillons prélevés par objet n'est pas toujours suffisant pour une approche statistique, on s'est appuyé sur l'écart à la moyenne pour évaluer l'hétérogénéité des teneurs observées.

Pour l'essentiel des objets géologiques, l'hétérogénéité obtenue apparaît similaire ou inférieure à celle présagée au départ pour établir le plan d'échantillonnage. Cette approche permet de faire ressortir 5 objets pour lesquels l'écart des teneurs en As à la moyenne est important ou significatif. Par rapport aux 36 objets géologiques étudiés, cela représente moins de 15 % de ceux-ci.

Ainsi, l'objet géologique 6 correspondant à des leucogranites et pegmatites, dont l'hétérogénéité a été estimée *a priori* moyenne sur des bases bibliographiques, montre un écart à la moyenne important (> 100 %), reflétant une forte hétérogénéité, qui peut être liée à des filons. Ceci a conduit à renforcer l'échantillonnage sur cette entité, où 6 échantillons supplémentaires ont été prélevés par rapport aux 16 échantillons initialement prélevés. Par ailleurs, la vérification de la nature des échantillons prélevés et des entités géologiques obtenues à partir de la carte géologique harmonisée a permis, pour 17 échantillons, de valider leur appartenance à l'entité cartographiée.

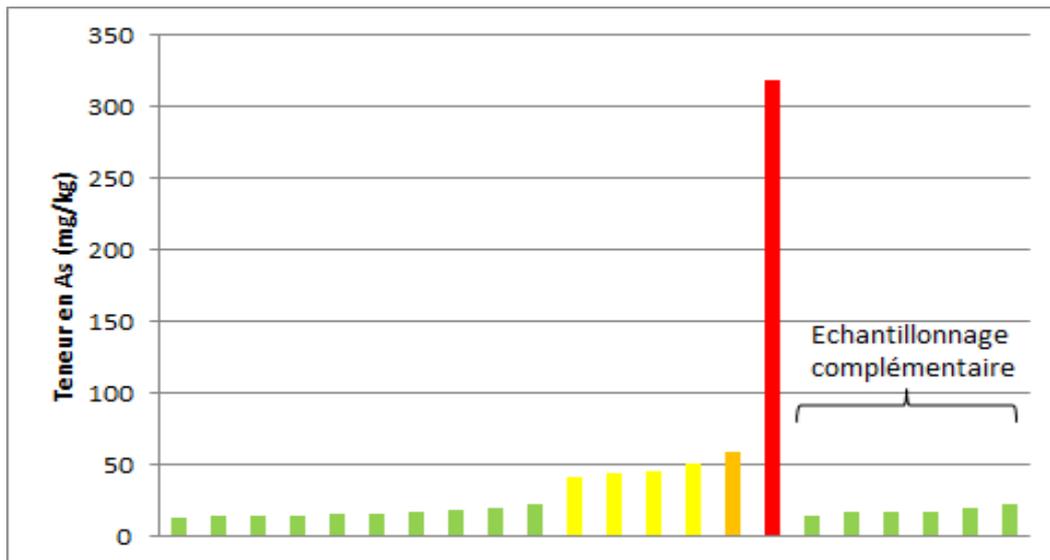


Illustration 32 : Histogramme de répartition des teneurs en As des échantillons de sols prélevés au droit de l'objet géologique 6 correspondant aux leucogranites et pegmatites.

L'objet géologique 9, correspondant à des mylonites, dont l'hétérogénéité a été évaluée comme moyenne sur des bases bibliographiques, montre également un écart à la moyenne important pour les teneurs en As (> 100 %). Compte-tenu de sa faible surface, un seul échantillon supplémentaire a été prélevé. L'hétérogénéité forte des teneurs en As ainsi constatée peut être associée au fait que les mylonites se situent dans une zone d'accident tectonique (qui sont souvent le lieu d'hydrothermalisme et de minéralisations sulfurées).

Pour les objets géologiques g3, i3 et h2, montrant des écarts à la moyenne assez importants (86, 66, 65 % respectivement), 2 échantillons supplémentaires ont été prélevés sur chaque formation.

Les autres objets géologiques ayant des écarts à la moyenne importants correspondent à des entités identifiées comme hétérogènes à très hétérogènes.

V.2 - Croisement des données d'analyse avec les objets géologiques définis pour la stratégie d'échantillonnage

Pour étayer l'interprétation des données, celles acquises dans le cadre de METOTRASS ont été croisées avec les objets géologiques échantillonnés selon la stratégie d'échantillonnage. Dans ce cadre, les teneurs moyennes en éléments traces ont été calculées, ainsi que les proportions d'anomalies fortes et très fortes. Les résultats cartographiques sont détaillés ci-après et synthétisés également en Annexe 7 sous forme de planches.

V.2.1 - Teneurs moyennes en éléments traces des objets géologiques sélectionnés

La représentation spatiale des teneurs moyennes en éléments traces des objets géologiques (Illustration 33 à Illustration 36) amène les remarques suivantes :

- Pour l'arsenic, une corrélation nette avec la structure géologique apparaît, en particulier avec le cisaillement sud-armoricain où les mylonites montrent une teneur moyenne correspondant à la classe d'anomalie forte. Les zones d'anomalies modérées s'alignent également selon cet axe, ou correspondent à des granites et aux auréoles de métamorphismes associées (micaschistes notamment).
- Pour le plomb, aucune corrélation ne ressort.
- Pour le zinc, quelques alignements semblent ressortir, mais ils sont nettement moins marqués que pour l'arsenic.
- Pour le cuivre, une proportion importante des objets géologiques montrent des teneurs moyennes entre 30 et 60 mg/kg, ce qui correspond à des anomalies modérées. Deux objets géologiques situés au sud-est de Nantes présentent des anomalies fortes à très fortes. Il s'agit de roches basiques et ultrabasiques, dont certaines sont occupées par des vignobles.

Teneurs moyennes en mg/kg :

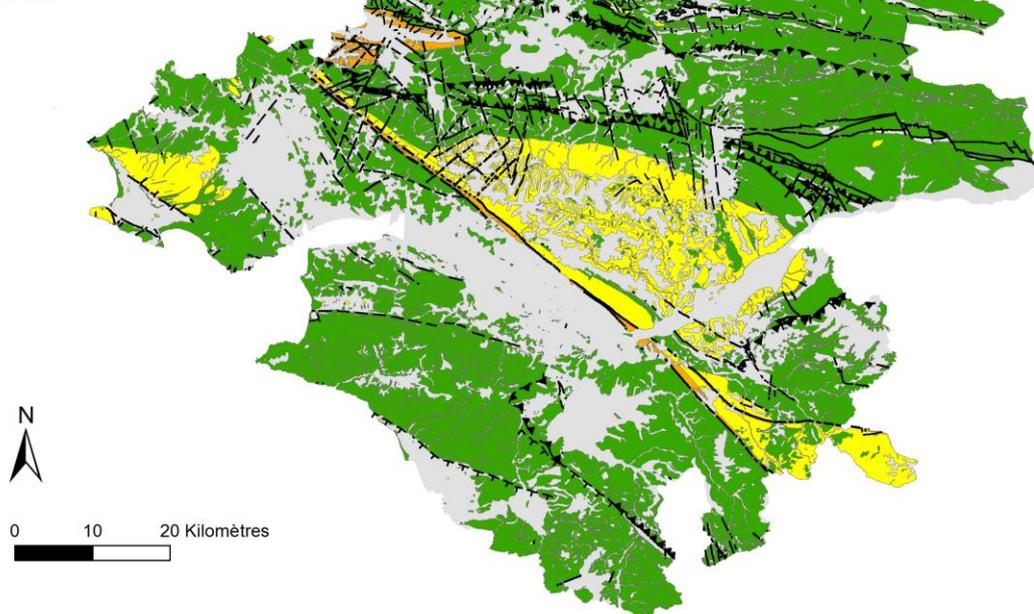
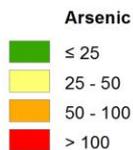


Illustration 33 : Teneur moyenne en As (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

Teneurs moyennes en mg/kg :

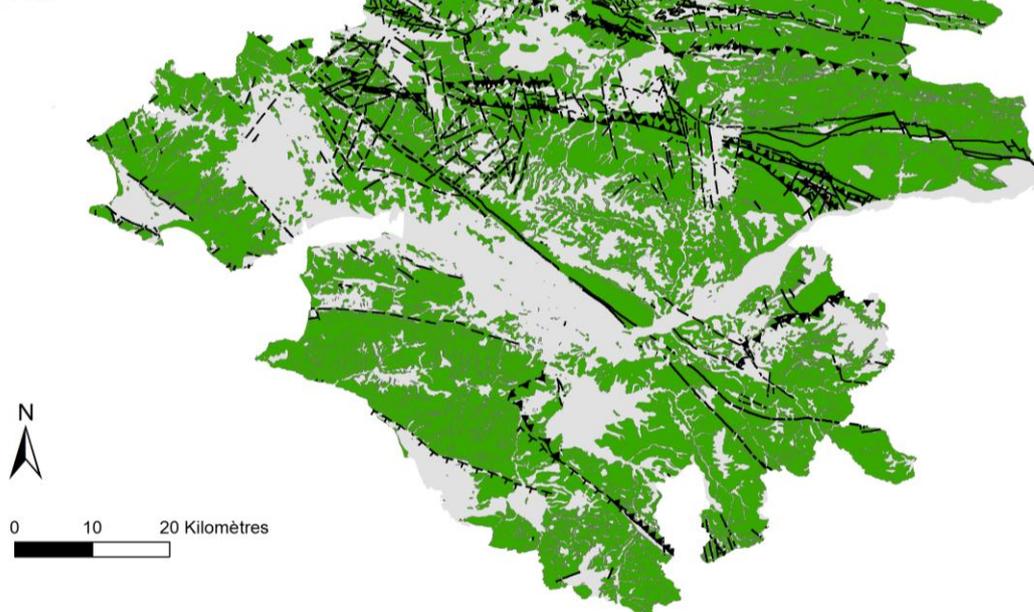


Illustration 34 : Teneur moyenne en Pb (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

Teneurs moyennes en mg/kg :

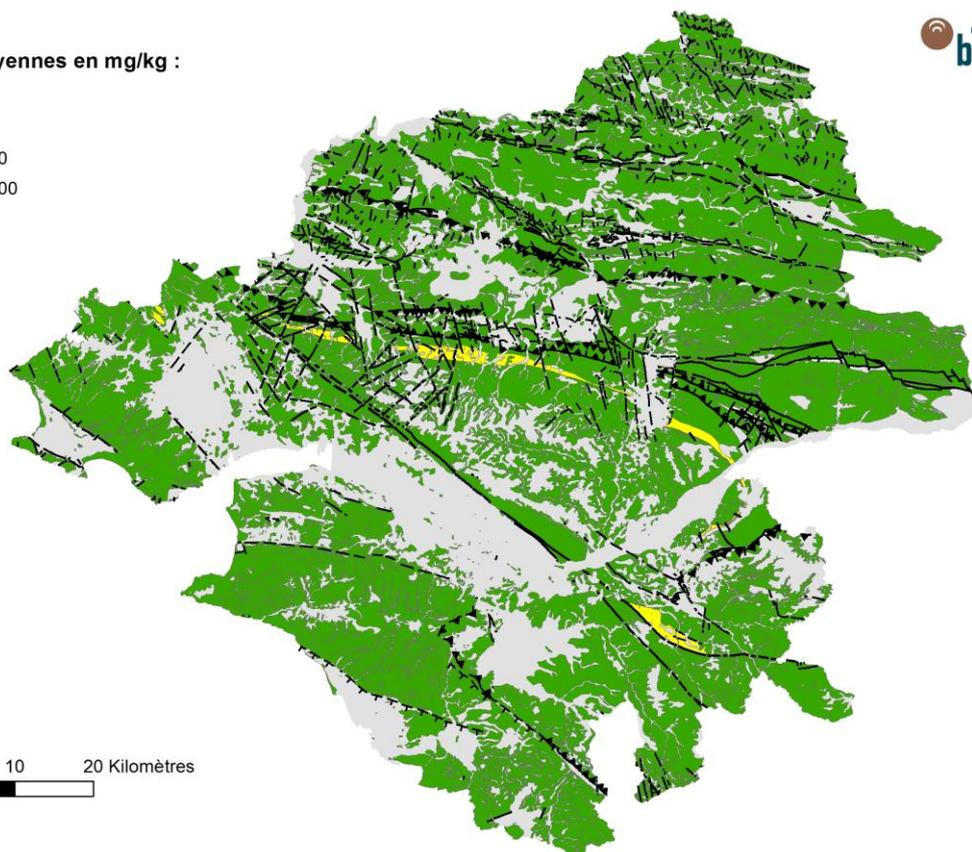
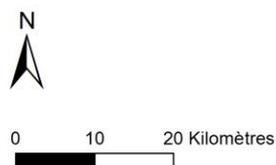


Illustration 35 : Teneur moyenne en Zn (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

Teneurs moyennes en mg/kg :

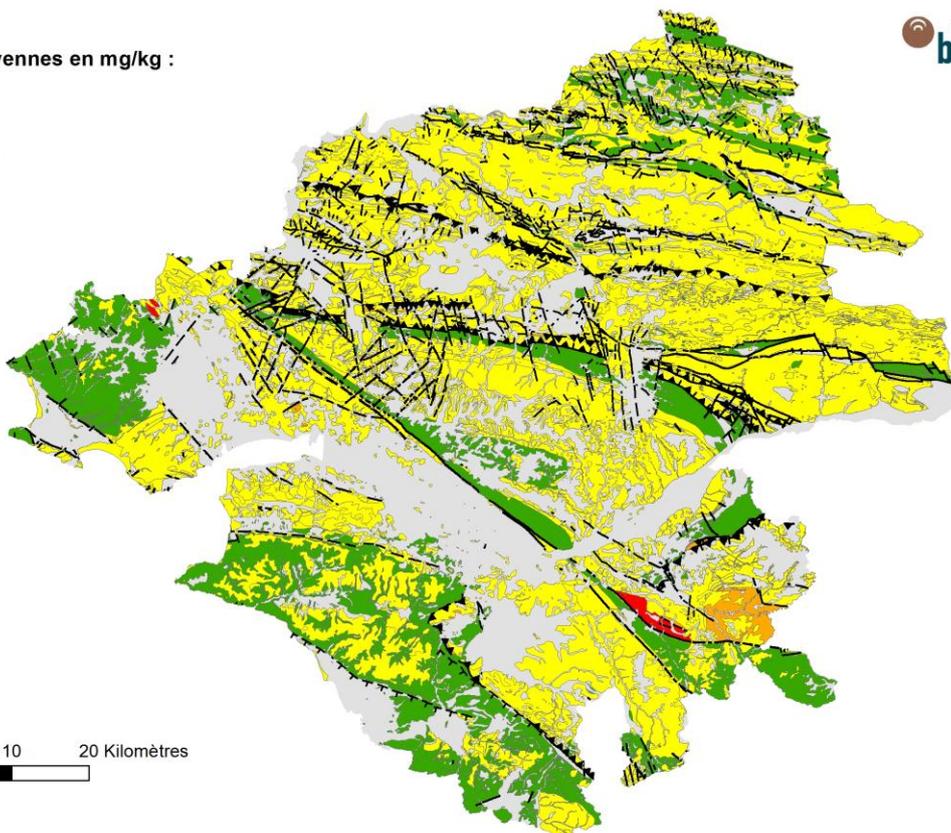
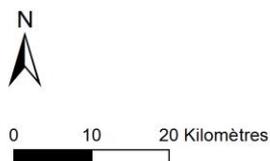
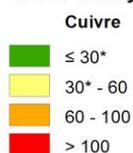


Illustration 36 : Teneur moyenne en Cu (mg/kg) des objets géologiques étudiés selon les classes d'anomalie définies (jaune : modérée ; orange : forte ; rouge : très forte)

V.2.2 - Proportion d'anomalies en éléments traces des objets géologiques sélectionnés

Les cartes de proportions d'anomalies en éléments traces obtenues à partir des données collectées dans le cadre du programme METOTRASS permettent d'approcher la probabilité d'anomalie en éléments traces par objet géologique à l'échelle départementale.

La représentation spatiale des proportions d'anomalies fortes et très fortes en éléments traces des objets géologiques amène les remarques suivantes :

- a) Ce mode de représentation renforce la mise en évidence de la corrélation entre les teneurs en arsenic dans les sols et le contexte géologique et tectonique du département. Une proportion élevée d'anomalies très fortes est ainsi constatée dans les mylonites du cisaillement sud armoricain (Illustration 37). Une proportion importante d'anomalies fortes est par ailleurs constatée dans les micaschistes périphériques à des granites.
- b) Le plomb (Illustration 38) montre d'après le jeu de données acquis peu d'objets géologiques présentant des anomalies fortes, et aucun présentant des anomalies très fortes.
- c) Aucun objet géologique ne montre d'anomalie forte ou très forte en zinc.
- d) Pour le cuivre, les objets enrichis semblent liés à une structure géologique. Les zones situées sur ou à proximité de la faille de Nord-sur-Erdre semblent ainsi plus marquées par des anomalies fortes (Illustration 39). L'interprétation de ces résultats mériterait une analyse plus poussée, pour bien vérifier l'influence ou non d'éventuels apports anthropiques de Cu, notamment dans les zones viticoles très présentes au sud-est du département.

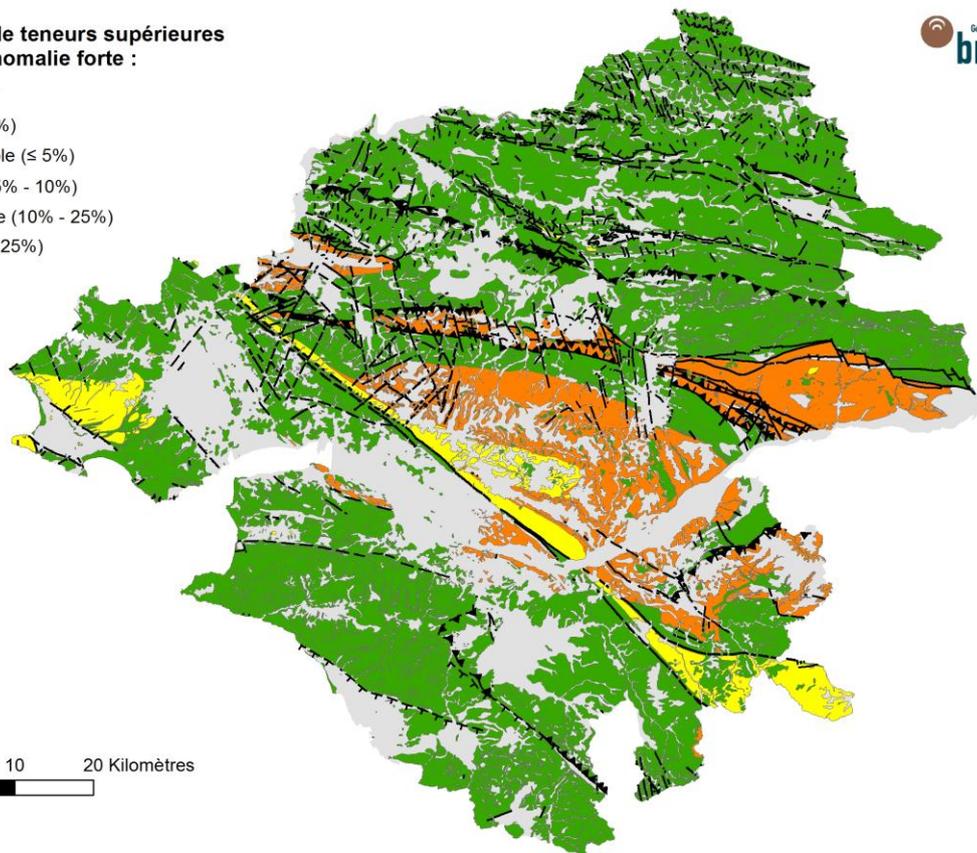
La comparaison des proportions d'anomalie calculées avec d'autres jeux de données est présentée en Annexe 8 sous forme de planche par élément. Elle montre les problèmes de représentativité qu'il y aurait à considérer les données disponibles, que ce soit dans leur ensemble ou de manière partielle, mais sans discriminer les origines anthropiques ni les problèmes de représentativité d'échantillons.

Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie forte :

- Arsenic**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)



0 10 20 Kilomètres



Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie très forte :

- Arsenic**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)



0 10 20 Kilomètres

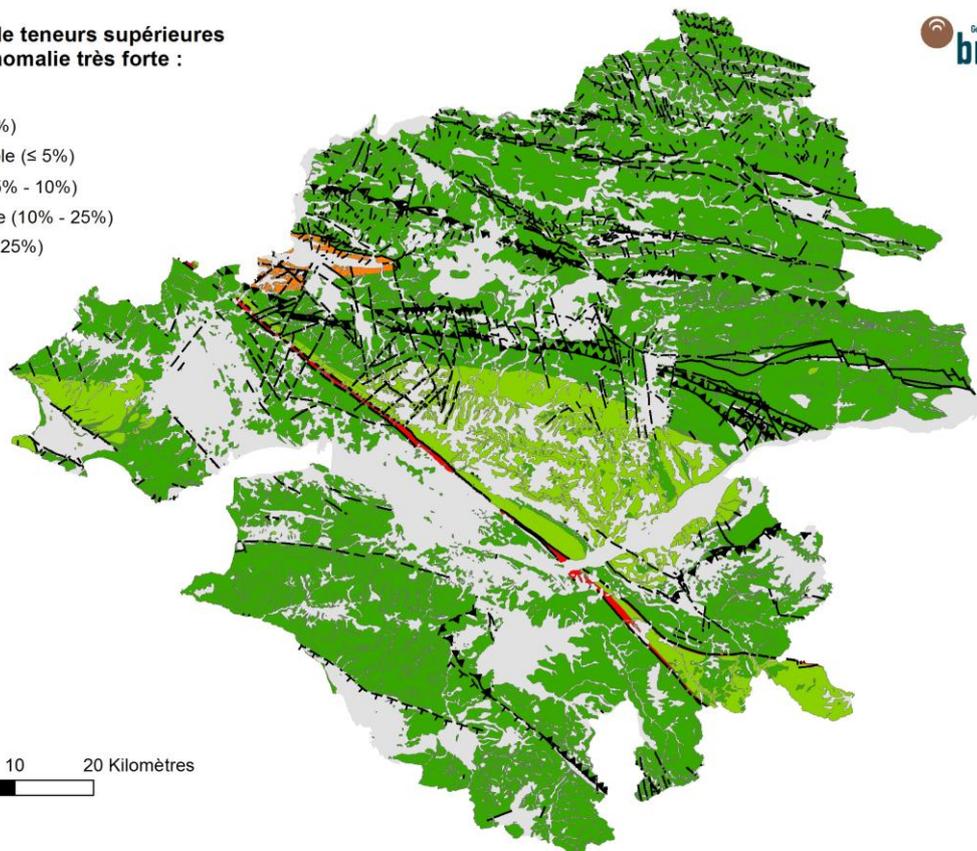
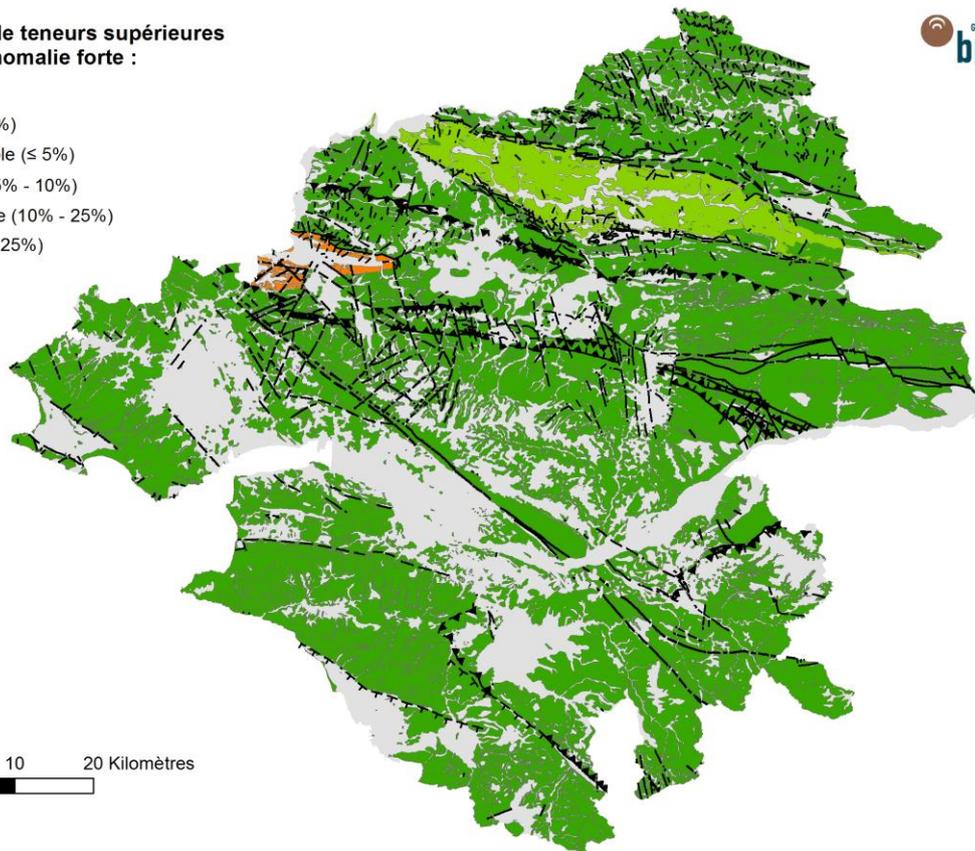
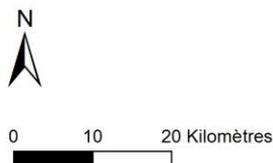


Illustration 37 : Proportion d'anomalie forte (en haut) ou très forte (en bas) en As (mg/kg) des objets géologiques étudiés

Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie forte :

- Plomb**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)



Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie très forte :

- Plomb**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)

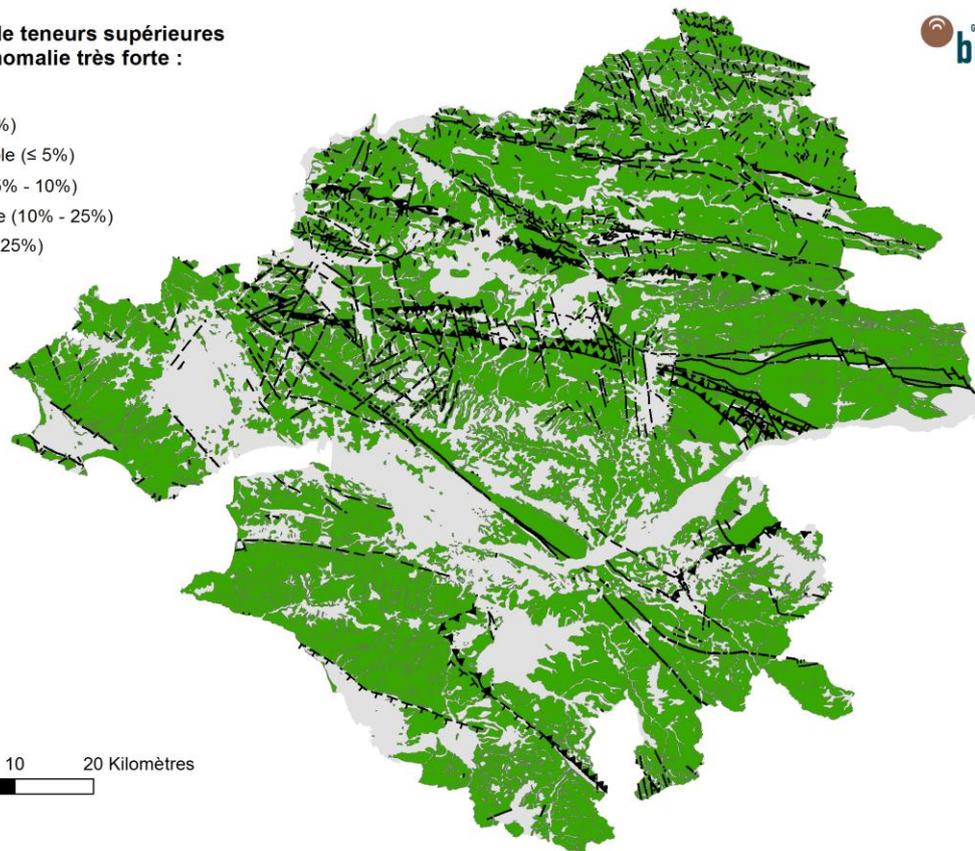
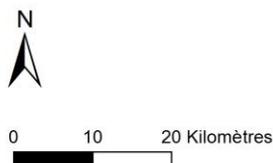
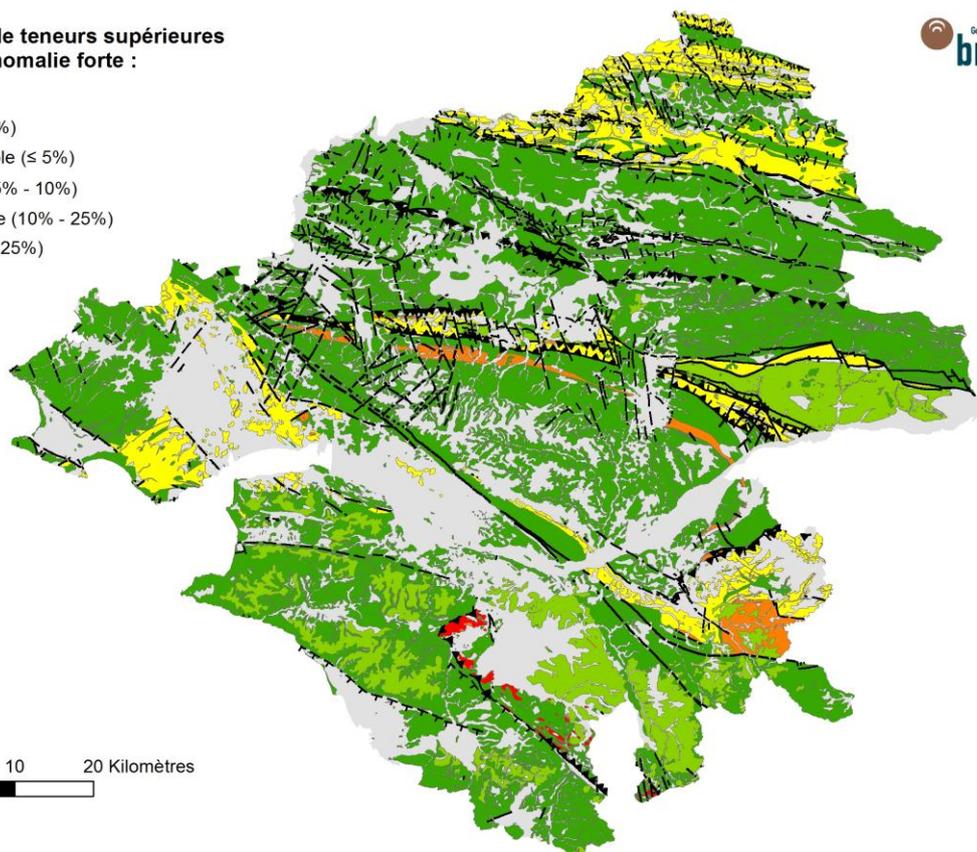
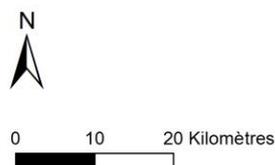


Illustration 38 : Proportion d'anomalie forte (en haut) ou très forte (en bas) en Pb (mg/kg) des objets géologiques étudiés

Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie forte :

- Cuivre**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)



Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie très forte :

- Cuivre**
- Nulle (0%)
 - Très faible ($\leq 5\%$)
 - Faible (5% - 10%)
 - Moyenne (10% - 25%)
 - Forte ($> 25\%$)

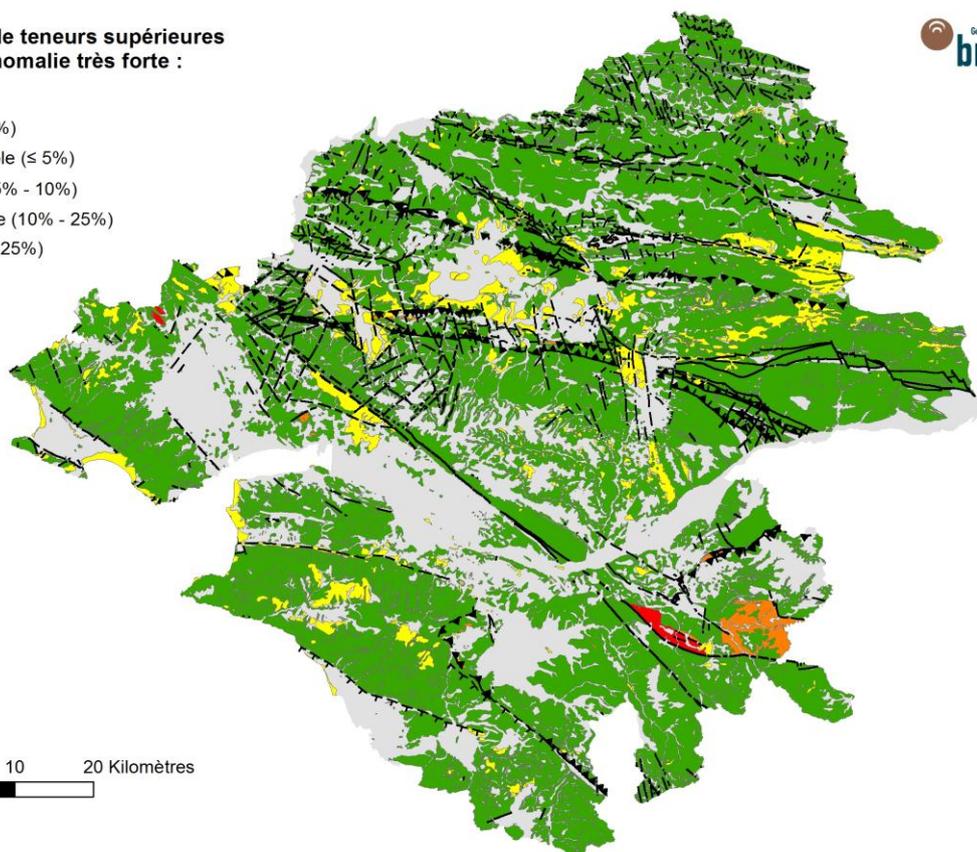
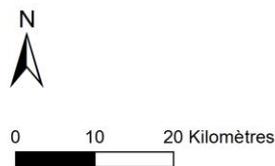


Illustration 39 : Proportion d'anomalie forte (pointillé orange) ou très forte (pointillé rouge) en Cu (mg/kg) des objets géologiques étudiés

V.2.3 - Apport des données acquises

L'approche méthodologique développée peut s'appliquer à différentes échelles :

- à l'échelle départementale pour appréhender les zones potentielles d'anomalie naturelle, afin de cibler par exemple les zones susceptibles de présenter des risques sanitaires pour la population (cf. par exemple problèmes de plombémie ou d'intoxication à l'arsenic via les sols et/ou les eaux souterraines)
- à l'échelle communale pour présager des origines possibles des anomalies constatées dans les sols (ex. problèmes dans des jardins familiaux à Nantes)
- à l'échelle locale pour orienter les choix d'échantillonnage. La connaissance du contexte géologique est importante dans l'étude des sites et sols pollués, dans le cadre notamment de la recherche d'une référence de fond géochimique, ou de bruit de fond géochimique. Dans ce cadre cependant, la carte géologique à 1/50 000e reste bien généralement trop imprécise et une étude géologique locale s'avère nécessaire. Il faut aussi considérer les apports éventuels de remblais, fréquents sur les sites industriels et en milieu urbain.

Cette étude montre l'intérêt de constituer des bases de données de la qualité des sols (fond géochimique naturel, mais aussi bruit de fond géochimique incluant des apports anthropiques diffus en milieu agricole, urbain, ...) pour gérer les sols, et notamment pour :

- appréhender les risques sanitaires liés à l'ingestion de sol ou à l'ingestion indirecte via l'alimentation (cf. jardins potagers notamment),
- servir de base de connaissance dans l'élaboration des plans d'épandage de boues de station d'épuration.

Conclusion

Dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires et environnementaux, il est important d'avoir une estimation des teneurs présentes naturellement (ou de manière usuelle) dans les sols. Cet état de référence peut servir par exemple dans la gestion des sites et sols pollués, ou dans le cadre de l'épandage de boues de station d'épuration sur des sols agricoles, ou lors d'études en lien avec des risques sanitaires (plombémie par exemple).

La présence d'éléments traces dans les sols et les eaux peut avoir une origine naturelle (fond géochimique), en lien avec la composition des roches mères à l'origine des sols. A l'échelle du territoire métropolitain français, il existe des données de géochimie des sols, mais il est difficile de faire la part entre les origines naturelles ou anthropiques des éléments traces. Parmi les données disponibles, certaines sont acquises avec une approche maillée régulière. C'est le cas par exemple du réseau de mesure de la qualité des sols agricoles, qui sert de référentiel national. Compte-tenu de la complexité de l'hétérogénéité lithologique et spatiale de la géologie, notamment en domaine de socle, l'approche à maille régulière de grande taille n'apparaît pas adaptée. Il en ressort le besoin d'un développement méthodologique spécifique permettant d'établir un référentiel sur les teneurs en éléments traces dans les sols développés sur roches de socle.

Le projet METOTRASS a ainsi élaboré une stratégie d'échantillonnage permettant d'optimiser le nombre de prélèvements à engager en vue d'élaborer une carte départementale de référence du fond géochimique, dont l'échelle de validité dépend de celle des cartes géologiques disponibles utilisées (1/50 000e).

Pour mettre en place la méthodologie à l'échelle départementale, la connaissance scientifique (géologie, genèse des sols) et les données de géochimie existantes ont été mises en perspective pour élaborer une stratégie d'échantillonnage optimale et permettre un traitement pertinent de l'information acquise. L'application sur le département de Loire-Atlantique avait pour objectif de développer et tester la méthodologie déjà initiée à l'échelle communale en 2006. Le projet a ciblé spécifiquement l'arsenic et le plomb, qui posent des problèmes sanitaires dans le département, ainsi que le cuivre et le zinc, dont l'analyse est effectuée dans les sols avant épandage de boues de station d'épuration. Les autres éléments (en particulier le Cd) n'ont pas été étudiés car les teneurs attendues sont inférieures à la limite de détection de l'appareil d'analyse utilisé (fluorescence X portable pXRF Niton 792).

La stratégie d'échantillonnage mise en place s'appuie sur un plan d'échantillonnage stratifié. Les différentes étapes du développement méthodologique correspondant sont résumées ci-après :

a) Définition des entités géologiques à échantillonner

Les entités (ou objets) géologiques correspondent aux strates de la méthodologie d'échantillonnage. Du fait de la complexité de la géologie de la zone d'étude (département de Loire-Atlantique), conduisant à un très grand nombre de formations géologiques, des regroupements des formations, en fonction de leur lithologie et de leur âge, ont été opérés pour limiter le nombre d'entités. Le développement méthodologique correspondant est adaptable à d'autres régions de contexte similaire. Pour s'adapter aux moyens financiers du projet, seuls les sols développés sur les objets géologiques de plus de 20 km² ont été retenus pour l'échantillonnage.

b) Evaluation de l'homogénéité/hétérogénéité géochimique au sein de chaque entité géologique

L'hétérogénéité géochimique des entités géologiques a été déterminée à partir d'une compilation des données de géochimie existantes, des caractéristiques géologiques et géochimiques des formations géologiques et de l'histoire géologique régionale. Pour exploiter les données de géochimie existante, des seuils d'anomalie ont été définis à partir des teneurs usuelles rencontrées dans les sols français et validés par les partenaires financiers du projet (ARS des Pays de la Loire, ADEME).

c) Définition d'un nombre d'échantillons par entité géologique

Ce nombre est fonction de l'hétérogénéité de l'entité géologique et de sa superficie : la densité d'échantillons croît ainsi avec le degré d'hétérogénéité des entités géologiques. Le positionnement des points d'échantillonnage s'est appuyé sur des mailles régulières adaptées à l'hétérogénéité géochimique des objets géologiques. Pour s'affranchir des influences anthropiques, il est apparu préférable de positionner les points de prélèvements en domaine forestier ou boisé.

d) Campagne de prélèvement et d'analyses chimiques

Les prélèvements correspondent à des échantillons composites. Ils ont été analysés par fluorescence X portable, après préparation au laboratoire (incluant séchage et tamisage à 2 mm). Quelques échantillons ont été analysés par ICP-MS pour comparaison et calibration.

e) Traitement des données

Le traitement des données a compris un traitement statistique, une vérification/comparaison de l'hétérogénéité *a priori* et constatée ainsi que la cartographie des teneurs moyennes et des hétérogénéités. Les seuils d'anomalie définis précédemment ont été utilisés dans ce cadre.

Les résultats acquis montrent que la majorité des sols analysés sur le département de la Loire-Atlantique ne présentent pas d'anomalie en éléments traces étudiés. La présence d'anomalies apparaît plus marquée pour l'arsenic, et dans une moindre mesure pour le cuivre. Le plomb montre peu d'anomalies fortes (100-500 mg/kg) et aucune anomalie très forte (> 500 mg/kg), le zinc n'en montrant aucune des deux (teneurs < 250 mg/kg). La représentation cartographique des teneurs moyennes en éléments traces des objets géologiques étudiés et des proportions de teneurs correspondant à des anomalies fortes ou très fortes montre dans le cas de l'arsenic une corrélation très nette avec le contexte géologique (périphérie de certains granites) et tectonique (cisaillement sud armoricain).

Compte-tenu de l'échelle de validité des données acquises sur le département de la Loire-Atlantique (limitée par celle des cartes géologiques disponibles utilisées : 1/50 000e et l'échelle départementales de travail), des investigations complémentaires sont nécessaires pour des besoins à une maille plus fine.

Le projet METOTRASS apporte des développements méthodologiques utiles pour optimiser les moyens nécessaires à l'établissement de cartes et de bases de données de référence sur les concentrations naturelles en éléments traces (As, Pb, Zn, Cu) des sols développés sur roches de socle en milieu forestier, donc hors zones d'activités anthropiques (agricoles ou autres). La pertinence d'utiliser le contexte géologique et plus particulièrement la géométrie des formations géologiques pour guider l'échantillonnage des sols est confirmée. L'adaptation de la densité d'échantillons de sol prélevés en fonction de l'hétérogénéité géochimique de la roche mère apparaît également pertinente.

Cette méthodologie permet en effet de réduire le nombre de points d'échantillonnage. Sans prendre en compte la géologie, une densité de points beaucoup plus importante serait nécessaire pour aboutir à un résultat équivalent.

Des développements complémentaires apparaissent toutefois nécessaires pour :

- a) préciser la densité d'échantillons de sol nécessaire dans le cas de concentrations fortes très ponctuelles liées à des filons, ou pour cartographier de tels filons ;
- b) améliorer la cartographie des formations géologiques superficielles, qui sont soit absentes, soit cartographiées de manière imprécise sur les cartes géologiques (et pédologiques) actuelles.

La technique d'analyse par fluorescence X portable, utilisée ici pour acquérir les teneurs en éléments traces, apparaît un outil très utile pour construire ce type de carte. En effet, pour un budget donné, elle permet de réaliser un nombre d'analyse beaucoup plus important que les techniques classiques. Du fait de l'erreur de représentativité des échantillons utilisés pour l'analyse, l'incertitude globale d'analyse apparaît en outre équivalente à celle de l'ICP si on compare différentes analyses d'un même échantillon de sol. Cette technique permet également d'éviter les impacts environnementaux liés à la préparation de l'échantillon (cf. dissolution acide, ...). En effet, les analyses (non destructives) sont réalisées directement sur les échantillons de sol après une préparation simple.

La méthodologie développée pour la stratégie d'échantillonnage peut être appliquée dans d'autres contextes géologiques, pas seulement sur des roches de socle. Dans ce cadre, pour tenir compte de la géométrie des roches mères et de leur hétérogénéité géochimique, différentes tailles de maille peuvent être proposées pour guider l'échantillonnage.

Elle peut s'appliquer à différentes échelles :

- à l'échelle départementale pour appréhender les zones potentielles d'anomalie naturelle, afin de cibler par exemple les zones susceptibles de présenter des risques sanitaires pour la population (cf. problèmes de plombémie par exemple, ou via l'arsenic)
- à l'échelle communale pour présager des origines possibles des anomalies constatées dans les sols (ex. problèmes dans des jardins familiaux à Nantes)
- à l'échelle locale pour orienter les choix d'échantillonnage. La connaissance du contexte géologique est importante dans l'élaboration d'études d'impact ou lors des diagnostics de sites et sols pollués, notamment pour rechercher une référence de fond géochimique, ou de bruit de fond géochimique. Dans ce cadre cependant, la carte géologique au 1/50 000 reste trop

imprécise et il faut aussi considérer les apports éventuels de remblais, fréquents sur les sites industriels et en milieu urbain.

Elle montre l'intérêt de constituer des bases de données de la qualité des sols (fond géochimique naturel, mais aussi bruit de fond géochimique incluant des apports anthropiques diffus) pour gérer les sols, et notamment pour :

- appréhender les risques sanitaires liés à l'ingestion de sol ou à l'ingestion indirecte via l'alimentation,
- servir de base de connaissance dans l'élaboration des plans d'épandage de boues de station d'épuration.

Bibliographie

ARRETE DU 8 JANVIER 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

BAIZE D. (2000), *Teneurs Totales en " Métaux Lourds " Dans les Sols Français : Résultats Généraux du Programme ASPITET*, INRA éditions, Orléans (France), 17p.

BAIZE D. (2004). Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français. Courrier de l'environnement de l'INRA n°39. l'INRA n°39. <http://www.inra.fr/dpenv/baizec39.htm>

BAIZE D., DESLAIS W. ET SABY N. (2008) Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. [Rapport final](#). ADEME. Angers, Convention 0375 C0035.

BARBIER J., BAUDRY D., CHERY L., RUPPERT N., SEGUIN J.-J., VIGOUROUX P. (2001) – *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines*. Rapport d'avancement n°1. Etude bibliographique. Rapport BRGM/RP-50403, 185 p., 25 fig., 21 tab., 3 annexes, 19 pl.

BOURRELIER P.H., Berthelin J. et al. (1998), *Contamination des Sols par les Éléments en Traces : les Risques et Leur Gestion*, Académie des Sciences, Paris (France), rapport n°42, 480 p.

CERTU – CETE Méditerranée (Février 2002) – *Dispersion de la pollution aux environs d'une route : calculs de risques sanitaires*, volet « santé » 48p.

CNRSSP (2006) – *Stratégie et technique d'échantillonnage des sols pour l'évaluation des Pollutions* (fascicule II typologie des plans d'échantillonnage), CNRSSP, 35p.

DARMENDRAIL D., BAIZE D., BARBIER J., FREYSSINET P., MOUVET C., SALPÉTEUR I., WAVRER P. (2000) – *Fonds géochimique naturel : Etat des Connaissances à l'échelle nationale* – BRGM/RP-50158-FR. 93 p., 24 fig., 14 tab.

DARNLEY A.G., BJORKLUND A., BØLVIKEN B., N. GUSTAVSSON, P.V. KOVAL, J.A. PLANT, A. STEENFELT, M. TAUCHID AND XIE XUEJING, with contributions by **R.G.GARRETT AND G.E.M.HALL** (1995) *Global geochemical database for environmental and resource management -Recommendations for International Geochemical Mapping*, Final Report of IGCP Project 259, Published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), ISBN 92-3-103085-X.

FOUCAULT A. et RAOULT J.-F. (2006) Dictionnaire de géologie, Editions Dunod

GREFFIÉ C., ARTIGNAN D., DESCHAMPS Y. ET ITARD Y. (2004) - *Caractérisation des pollutions potentielles relatives aux sites miniers du territoire français métropolitain*, Rapport final. BRGM/RP-52816-FR, 55 p., 2 fig., 7 tabl., 4 ann.

JOLIVET C., BOULONNE L ET RATIE C. (2006) *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.

LACHASSAGNE P., WYNS R., BÉRARD P., BRUEL T., CHÉRY L., COUTAND T., DESPRATS J.-F., LE STRAT P. (2001) - *Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones*. Ground Water, 39, (4), pp. 568-581.

LACHASSAGNE, P., WYNS,R (2005) - *Aquifères de socle : nouveaux concepts -Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau*, Géosciences, n° 2, septembre 2005.

LAPERCHE V., BEAULIEU M. ET AUGER P. (2004) *Evaluation des performances d'un spectromètre de fluorescence X portable (NITON ® XLt792WY)*. Usages et limites pour la caractérisation des sites et sols potentiellement pollués – BRGM, 29 p

LAVEAU E. (2005) - *Réduction des doses de cuivre et lutte contre le mildiou de la vigne en Aquitaine*, CHAMBRE D'AGRICULTURE GIRONDE, 4p.

LE GUERN C., COULON A. avec la collaboration de **BAUDOIN V., LOTRAM Y., MONTFERRAND M., SCHROETTER J.-M. ET BÉCHENNEC F.** (2009) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Loire-Atlantique*. Rapport BRGM/RP-56818-FR, 122 p., 29 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

LE GUERN C., JAVANAUD T., BAUDOIN V. ET CONIL P. AVEC LA COLLABORATION DE F. BÉCHENNEC ET B. CLOZEL (2007) *Cartographie des teneurs en arsenic et plomb des sols d'un ensemble de communes de Loire-Atlantique*, Rapport BRGM/RP-55696-FR, 146 p., 39 illustrations, 5 annexes.

NOWAK C., MOSSMANN J.-R., SAADA A., (2002). *Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en oeuvre*. Rapport BRGM/RP-51960-FR, 97 p., 9 fig., 10 tabl., 4 ann.

PAGOTTO (1999) - *Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers.

ROBERT M. (1996), *Le sol, une Interface Dans l'Environnement, une Ressource Pour le Développement*, Masson, Paris (France).

SETRA (Décembre 2004) – *La pollution des sols et des végétaux à proximité des routes, les éléments traces métalliques (ETM)*, note d'information, 12p.

SONNEY R., BLUM A., CHÉRY L., (2005) *Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône-Méditerranée-Corse*. Rapport de phase 1 - Recueil des données et des informations. Rapport BRGM RP-54031-FR, 135p.

THIEBLEMONT D. ET BOURGUIGNON A. (1996) Réalisation d'une « Image lithogéochimique » de la France à 1/1 000 000 ; Evaluation de gammes de teneurs moyennes en 10 éléments traces (As, Ba, Cr, Cu, Li, Ni, Pb, Sr, Zn) pour les principaux faciès de roches cristallines françaises. Rapport BRGM RR-39191-Fr, 66 p.

WYNS R., BALTASSAT J. M., LACHASSAGNE P., LEGTCHENKO A., VAIRON J. (2004) - *Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France)*. Bulletin de la Société Géologique de France, 175, (1), 21-34

Référence des cartes et notices géologiques

AUDREN C., JEGOZO P., BARBAROUX L. et al. (1975) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille La Roche-Bernard (449) - BRGM Orléans. Carte géologique par C. Audren, P. Jegouzo, L. Barbaroux, P. Bouysse (1975)

BAMBIER A., FLAGEOLLET J.C., FORESTIER F.H. et al. (1982) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Clisson (509) - BRGM, Orléans. Carte géologique par F.H. Forestier, B. Lasnier, J.P. Burg, J.C. Flageollet, L. Poncet, J.M. Viaud (1982).

BARBAROUX L., CAVET P. (1983) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nort-sur-Erdre (451) - BRGM, France. Carte géologique par L. Barbaroux, P. Cavet, J. Marchand, B. Lasnier, G. Godard, J.P. Margerel, B. Bousquet, D. Sellier, G. Carlier (1983).

BECHENNEC F. (2007) - *Carte géologique harmonisée du département de Loire-Atlantique*. BRGM/RP-55703-FR, 369 p., 2 fig., 2 tab., 3 pl. h.-t.

CAVET P., ARNAUD A., BLAISE J. et al. (1970) – Notice explicative carte géol. France (1 /50 000), feuille Chalonnese-sur-loire (453) - BRGM, France. Carte géologique par P. Cavet, J. Blaise, M. Gruet, H. Lardeux, L.M. Rivière, A. Arnaud, L. Barbaroux, R. Brossé, H. Jourdainne, L. Chauris (1970).

CAVET P., ARNAUD A., BLAISE J. et al. (1978) – Notice explicative carte géol. France (1 /50 000), feuille Ancenis (452) - BRGM, France. Carte géologique par P. Cavet, J. Marchand, M. Gruet, H. Lardeux, L.M. Rivière, A. Arnaud (1978).

COGNE J., HASSENDORFER B., BARBAROUX L. (1973) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Nazaire (479) - BRGM, Orléans. Carte géologique par B. Hassenforder, L. Barbaroux, L. Berthois (1973).

DADET P., HERROUIN Y., BARDY P., LEBRET P., TRAUTMANN F., CARN A. (1995) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Pipriac (387). Orléans : BRGM, 75 p. Carte géologique par P. Dadet, Y. Herrouin, C. Blanchet, P. Bardy, A. Colleau (1995).

DUBREUIL M., CAVET P. avec la collaboration de BLAISE J., ESTÉOULECHOUXJ., GRUET M., LARDEUXH. (1989). Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Saint-Mars-la-Jaille (421). Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 73 p. Carte géologique : DUBREUIL M., BLAISE J., CAVET P., DIOT H., GRUET M. (1988).

FOURNIGUET J., TRAUTMANN F. (1985) - Notice explicative, carte géol. France (1/50 000), feuille Redon (419) – BRGM, France. Carte géologique par F. Trautmann, J. Delfour, J. Fourniguet, J.Y. Scanvic, G. Dubreuil, B. Pivette, J.P. Prian, C. Militon, B. Manigault (1984).

HERROUIN Y., DADET P., GUIGUES J., LAVILLE P., TALBO H. (1989) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Bain-de-Bretagne (388) — Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 82 p. Carte géologique par DADET P., HERROUIN Y., LAVILLE P., PARIS F. (1987).

HERROUINY., RABUD., avec la collaboration de CHANTRAINE J., CHAUVEL J.J., ETIENNE H. (1990) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Châteaubriant (389) — Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 51p. Carte géologique par HERROUINY., RABUD., FOURNIGUETJ. (1988).

JANJOU D., avec la collaboration de LARDEUX H., CHANTRAINE J., CALLIER L., ÉTIENNE H. (1998) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Segré (422). Orléans : BRGM, 68 p. Carte géologique par D. Janjou et coll. (1998).

LAHONDÈRE D., CHÈVREMONT P., BÉCHENNEC F., BOUTON P., GODARD G., STUSSI J.M. et la collaboration de VIAUD J.M., ROY C., COCHERIE A., REBAY G. (2008)- Carte géologique par Lahondère D., Chèvremont P., Godard G., Bouton P., Béchenec F., Rebay G., Santarelli N., Viaud J.M. (2008).

MARCHAND J., BOSSIÈRE G., SELLIER D., avec la collaboration de ALIX Y., ETIENNE H., LULZAC Y., CLÉMENT J.P. (1989) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille SAVENAY (450) - Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 58 p. Carte géologique par MARCHAND J., SELLIER D., BOSSIÈRE G. et coll. (1988).

MARCHAND J., PERRIN J., WEECKSTEEN G. (1969) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Vallet (482) - BRGM, Orléans. Carte géologique par J. Marchand, J. Perrin, G. Weecksteen, F. H. Forestier, B. Lasnier (1969).

TERS M., MARCHAND J., WEECKSTEEN G. (1969) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nantes (481) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, B. Barthélémy, J. Marchand, R. Richard, G. Weecksteen, F.H. Forestier, B. Lasnier (1969).

TERS M., MARCHAND J., OTTMANN F. et al. (1978) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Paimboeuf (480) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J. Marchand, F. Ottmann (1978).

TERS M., VIAUD J.M., CHATEAUNEUF J.J. et al. 1978 – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Ile-de-NoirMoutier/Pointe de Saint-Gildas (506/533) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, D. Gouleau, J.R. Vanney (1978).

TERS M., BAMBIER A., CHANTRAINE J. et al. 1982 - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Philbert-de-Grand-Lieu (508) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters (1979).

TERS M., VIAUD J.M. (1983) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Challans (534) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J.M. Viaud, F. Verger, D. Gouleau (1983).

TERS M., OLLIVIER-PIERRE M.F., CHATEAUNEUF J.J. et al. (1979) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Machecoul (507) – BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J. Mounès, D. Gouleau (1978).

TRAUTMANN F. (1988) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nozay (420) - BRGM, Orléans. Carte géologique par F. Trautmann, M. Donnot, D. Lemaire, M.P. Cagnet-Mawhin (1987).

Sites Internet

<http://www.aquitaine-technique-innovation.com>

<http://basol.ecologie.gouv.fr/>

<http://basias.brgm.fr/>

http://www.brgm.fr/brgm/Fichiers/BRGM_presentation_fr.swf

<http://www.caribsat.com/argiles/expo/atexpo/>

<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>

<http://infoterre.brgm.fr>

<http://www.senat.fr>

<http://sigminesfrance.brgm.fr>

<http://www.gissol.fr/programme/bdat/bdat.php>.

Autres références consultées

ALGROS E. ET CHARISSOU A.-M. (2010) *Réalisation d'un avis d'experts : "Bruit de fond" des polluants dans de fond" des polluants dans l'environnement, analyse des données existantes et identification des lacunes*, Etude RECORD n°09-0812/1A, rapport final décembre 2010. www.record-net.org/record/etudesdownload/record09-0812_1A.pdf

ARTIGNAN D., CHERY L., HUSSON Y. (1995) – *Valorisation de l'inventaire géochimique du département de la Loire*. Rapport BRGM R 38397 SGR/RHA 95, 21 pages et 17 cartes annexées.

- BARBIER J., CHERY L.** (1997) – *Relation entre fond géochimique naturel et teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux*. Rapport BRGM/R-39544, 52 p., 4 fig., 7 tab.
- BLUM A., CHERY L., BARBIER J., BAUDRY D., PETELET-GIRAUD E.** (2002) – *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie*. Rapport final, Rapport BRGM RP-51549-FR, 5 volumes.
- BOURGINE B.**, (2009) *Maîtriser l'interpolation des données en cartographie*. Formation BRGM, 58p.
- BRGM** (1998) – *Cartographie des concentrations et des fonds géochimiques métalliques connus du massif des Vosges*. Rap. BRGM R 39979, 21 p., 19 fig.
- DICTOR M.C.**, Baranger P., Chéry L., Michel K., Barlier J., Clozel B., Touzé S., Le Gall A.C., Brosselin P. (2004) - *Synthèse des travaux de R&D en France (1999-2003) sur la thématique arsenic*. BRGM/RP-53252-FR, 130 p., 4 ill., 3 ann.
- GROUPE CHADULE** (1987) - *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Edition Masson, 2^{ème} édition, 185p.
- INERIS (PICHARD A., et al.,** (1996) - *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques ; l'arsenic et ses dérivés inorganiques*, 78p ; le cuivre et ses dérivés, 66p ; le zinc et ses dérivés, 69p.
- JEANNOT R., LEMIERE B., CHIRON S.** (2001) - *Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués*, Documents du BRGM 298, Orléans (France), 83 p.
- JOUBERT A., JAUZEIN M., LUCAS L., JOULIAN C. ET GARRIDO F.** (2006) – *Étude des processus biogéochimiques prépondérants responsables de la mobilité du Pb, Cd, Zn, As et Hg du sol vers l'hydrosphère*. Rapport de fin de première année de thèse. BRGM/RP-54483-FR, 151 p., 32 fig., 12 tabl., 18 ann.
- JOURDAN B., PIANTONE, P., LEROUGE, C., GUYONNET, D.** (2005) – *Atténuation des métaux à l'aval de sites de stockage de déchets – Synthèse bibliographique*. Rapport BRGM/RP-54417-FR.
- LAMBERT A.** (2005) – *Les données géochimiques et alluvionnaires de l'Inventaire minier du territoire national. Constitution d'une base de données exhaustive*. Rapport final. BRGM/RP- 53546-FR, 116 p., 6 fig., 6 tabl., 6 ann.
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J.** (novembre 2002) – *L'érosion hydrique des sols en France* – INRA, IFEN, 106p.
- LIONS J., PINSON S., AUNAY B.**, (2008) – *Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de la Réunion*. Rapport BRGM RP-56856 FR, 126p.
- THIEBLEMONT D., BOURGUIGNON.A.**, 1996 - *Réalisation d'une "image lithogéochimique" de la France à 1/1000000 : évaluation de gammes de teneurs moyennes en 10 éléments traces (As, B, Ba, Cr, Cu, Li, Ni, Pb, Sr, Zn) pour les principaux faciès de roches cristallines françaises*. Rapport BRGM R 39191, 66p., 9 fig. 3 tabl.

http://www.brgm.fr/brgm/Sites_sols_poll/main_content.html

<http://geo.polymtl.ca/>

<http://www.ineris.fr>

ANNEXES

Annexe 1 - Généralités sur les sols

A1.1- Sols : origine et typologie

Le sol constitue l'interface entre l'air, les eaux de surface ou de nappe et toutes les activités humaines, il détient un rôle majeur dans l'écosystème terrestre (Robert, 1996). Le sol est aussi défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes. Les fonctions du sol sont : le contrôle des cycles des éléments et de l'énergie en tant que compartiment des écosystèmes, le support des plantes, des animaux et de l'Homme ; la base des constructions et des immeubles ; la production agricole ; la rétention de l'eau et des dépôts ; la construction d'une réserve génétique ; la conservation en tant que mémoire de l'histoire et de la nature ; la protection en tant qu'archive archéologique et paléo-écologique (Norme ISO 11074).

Il constitue une importante zone d'échanges verticaux et horizontaux de matière et d'énergie. Son épaisseur est variable, de quelques décimètres à quelques mètres. Ces différents échanges aboutissent à une différenciation verticale du sol, on parle d'horizon pédologique. Les différents horizons se présentent comme suit (Illustration A1-1) :

- horizon A : mélange de matière organique et de matière minérale. Il se situe sous la couverture végétale et est structuré par l'activité biologique (faune, racines...).
- horizon B : horizon intermédiaire apparaissant dans les sols évolués. Il présente une accumulation de matière caractéristique.
- horizon C : horizon de transition avec la roche mère.
-

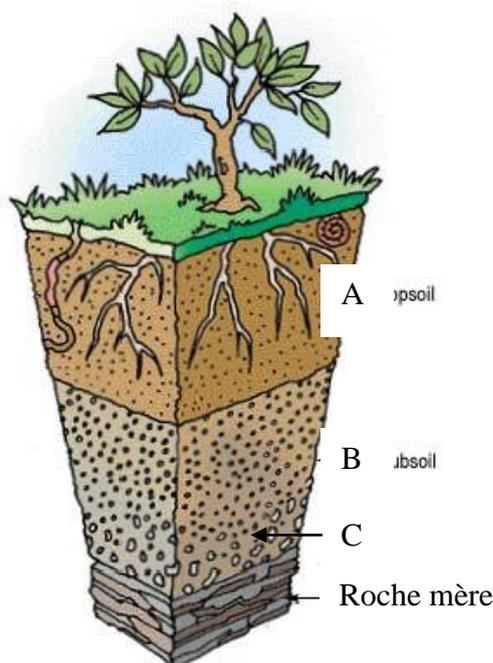


Illustration A1-1 : Principaux horizons des sols
(<http://www.aquitaine-technique-innovation.com>), modifié.

On observe avec la profondeur une diminution de la fraction organique (horizons A et B) et une augmentation des minéralisations (horizon C). En général, les teneurs maximales en arsenic, cuivre, plomb et zinc des sols hors sites industriels se situent entre les niveaux A et B (Darmendrail et al., 2000).

Le sol est un milieu meuble et poreux. L'illustration A1-2 présente la répartition des différentes phases composant le sol. La phase solide réunit la fraction minérale et la fraction organique. Les phases gazeuse et liquide, occupent l'intérieur des pores. Elles peuvent interagir à hauteur de 20% : <http://caribsat.com/argiles/expo/>

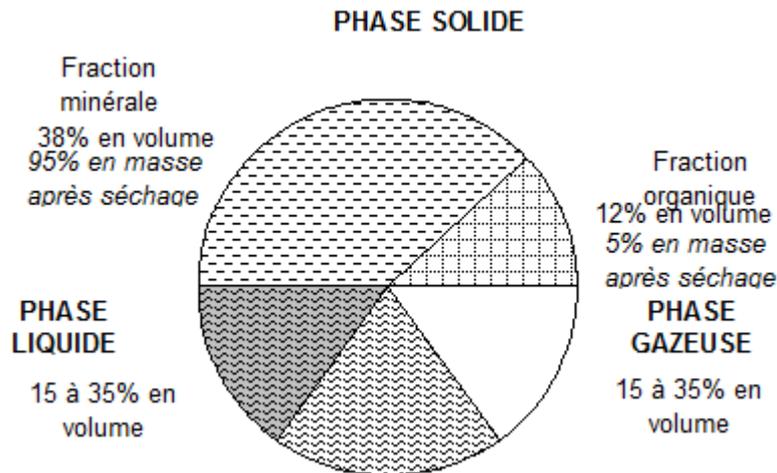


Illustration A1-2 : Répartition des principaux constituants du sol.
(<http://www.caribsat.com/argiles/expo/atexpo/>, 2010, modifié).

La fraction minérale peut être différenciée en différentes unités selon la granulométrie des éléments qui la compose. Une unité grossière regroupe toutes les particules supérieures à 2 microns (sables et limons). De par la nature de ces éléments, cette fraction présente de grandes variations de porosités. La fraction fine, particules inférieures à 2 microns, est principalement composée d'argiles et de colloïdes argileux. L'importance de cette partie fine caractérise l'affinité du sol à retenir l'eau qui la traverse par des phénomènes de capillarité.

La fraction minérale est issue de l'altération de la roche mère. Cette altération peut être physique (érosion, désagrégation mécanique, chocs thermiques) ou chimique (hydrolyse, oxydoréduction, hydratation/déshydratation, dissolution, complexation).

L'importance de ces processus d'altération est fonction du climat et de la géologie du sous-sol. Il existe ainsi différents types de sol (Illustration A1-3).

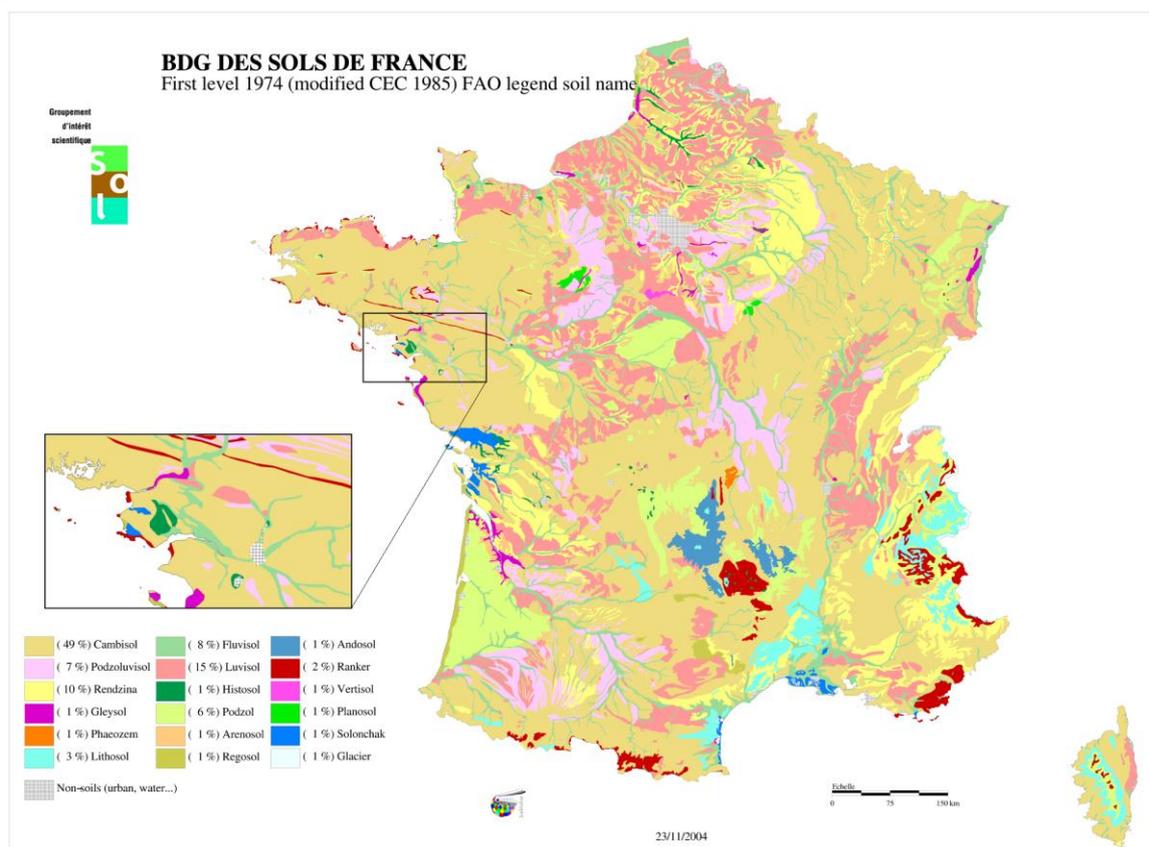


Illustration A1-3 : Les différents types de sols en France (Le Bissonais et al., 2002, modifié).

Les sols de Loire-Atlantique sont majoritairement des sols bruns (Cambisol). Quelques nuances sont cependant présentes, on retrouve des sols alluviaux (Fluvisol) en bordure du réseau hydrographique ; des sols lessivés dégradés (Podzoluvisol) en amas décamétriques à kilométriques ; quelques lentilles kilométriques de sols lessivés (Luvisol) orientées nord-ouest sud-est ; des sols tourbeux (Histosol) dans le marais de la Brière et au niveau du lac de Grand-Lieu. Des sols hydromorphes (Gleysol) sont présents le long de la Vilaine et au sud-ouest du département ; et enfin, quelques sols peu différenciés et peu épais de type rankers le long de la côte.

Ces sols peuvent être définis de la façon suivante (Duchaufour, 2009) :

- **Sols alluviaux (Fluvisol) :**

Les sols alluviaux sont localisés dans les lits majeurs des rivières. Ils sont souvent rajeunis par les dépôts de matériaux lors d'inondations. Ces sols révèlent la présence d'une nappe phréatique non réductrice. Ils sont riches. Ils offrent une grande importance éco-agricole.

Il est important de distinguer ces sols des sols alluviaux correspondants aux alluvions des anciennes terrasses qui eux sont dépourvues de nappes.

- **Sols hydromorphes (Gleysol) :**

Les Gleysols se forment en milieu très réducteur. La nappe phréatique permanente conditionne la formation des gleys. Ces sols présentent généralement la végétation suivante : aulne, grand carex, jonc etc. Les sols hydromorphes sont caractérisés par des phénomènes de réduction ou de ségrégation locale du fer, liés à une saturation temporaire ou permanente par l'eau provoquant un déficit en oxygène.

Les horizons profonds (gley réduit) sont occupés par la nappe et provoquent la réduction d'une partie du fer libre. Ce fer s'accumule sous la forme FeCO_3 ou de sels mixtes ferreux-ferrique (teinte verdâtre, « rouille verte »).

Lorsque l'humus est un hydromull, la forte activité biologique entraîne une importante production de CO_2 qui mobilise une partie du fer ferreux. Ce fer précipite alors au sein de l'horizon dit G0. Le gley est alors oxydé, on y observe des taches de couleur ocre ou rouille.



Gley oxydé

Illustration A1-4 : Photographie d'un sol hydromorphe présentant des oxydes (photo BRGM)

- **Sols tourbeux (Histosols) :**

La formation de tourbe nécessite la présence permanente de nappes très réductrices. Selon que l'eau soit d'origine pluviale ou souterraine, la tourbe est dite acide ou eutrophe. Les tourbières présentes dans le département font partie de la deuxième catégorie. La tourbe eutrophe résulte de la décomposition incomplète de la végétation hydrophile et neutrophile⁶.

- **Sols bruns (Cambisol):**

Les sols bruns sont caractéristiques des régions tempérées humides. L'humus est généralement un mull modérément acide. Il présente un profil A (B) C ou A B C. Les sols bruns se développent sur des matériaux variés et nécessitent un bon drainage.

- **Sols bruns lessivés (Luvisol) :**

Les sols bruns lessivés font suite aux sols bruns. Le processus de lessivage entraîne les particules fines (généralement des argiles et les hydroxydes de fer associés) vers l'horizon inférieur Bt appelé argique.

⁶ Une végétation est dite hydrophile si elle a besoin de fortes quantités d'eau tout au long de son développement (ex. saule blanc, aulne glutineux etc.) Neutrophile se dit de végétaux croissant dans des conditions de pH voisines de la neutralité (Delpech et al., 1985)

Annexe 2 – Histoire géologique de la Loire-Atlantique

L'histoire géologique de la Loire Atlantique fait partie intégrante de celle du Massif armoricain.

Le Massif armoricain constitue un tronçon affleurant de la chaîne varisque formé à l'ère primaire, entre 450 et 300 Ma environ. Il est constitué d'une croûte continentale d'âge protérozoïque à paléozoïque (granites, gneiss, schistes...). Sa structure résulte de la tectonique, du métamorphisme et de la granitisation associés à l'orogénèse hercynienne. Le découpage du socle se fait en quatre domaines lithostructuraux (Béchenec, 2007). Ces domaines sont séparés par des accidents majeurs tels que le Cisaillement Sud Armoricaïn (séparant le Domaine varisque nantais du Domaine varisque sud-armoricain) ou encore le décrochement chevauchant de Nort-sur-Erdre (qui sépare le Domaine varisque nantais du Domaine varisque ligéro-séan) (Illustration A2-1). Ils sont eux-mêmes composés de plusieurs unités séparées par des contacts tectoniques de moindre ampleur.

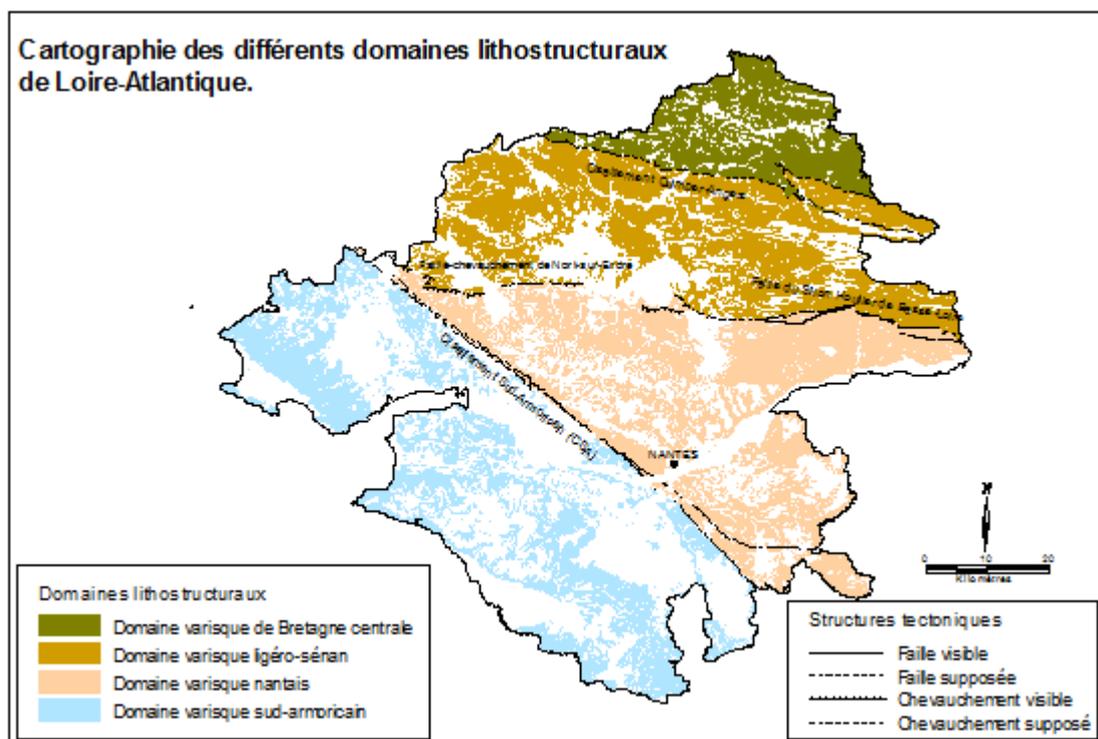


Illustration A2-1 : Carte des différents domaines lithostructuraux de Loire-Atlantique (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchenec, 2007)

Du nord au sud les domaines lithostructuraux ainsi que leurs unités majeures sont les suivants (Béchenec, 2007) :

- **Le Domaine varisque de Bretagne centrale** est limité sur son flanc nord par le cisaillement de Quimper-Angers. Il est composé de deux unités (Illustration A2-2) :
 - L'Unité briovérienne de Bretagne centrale, est majoritairement constituée de siltite et de quartzite avec quelques intercalations de conglomérat.
 - L'Unité du sud de Rennes recouvre en discordance l'unité précédente. Cet ensemble ordovico-silurien est essentiellement composé de grès quartzite, de siltite et d'argilite.

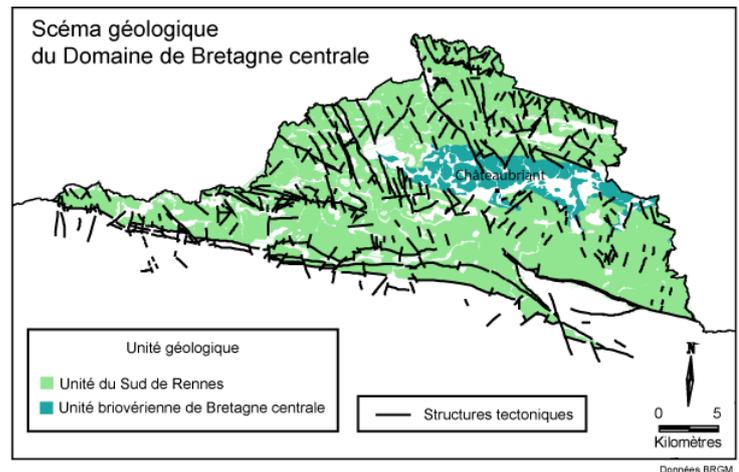


Illustration A2-2 : Schéma géologique du Domaine de Bretagne centrale (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchenec, 2007)

- **Le Domaine varisque ligéro-sénan**, limité sur son flanc sud par le décro-chevauchement majeur de Nord-sur-Erdre, est recoupé par différents plutons granitiques varisques dans la région de Nozay. Ce domaine comprend les cinq unités suivantes (Illustration A2-3) :
 - L'Unité de Péaule, est essentiellement schisto-gréseuse.
 - L'Unité de Saint-Julien de Vouvantes, est constituée de grès, de phtanite, de siltite ainsi que de quelques enclaves calcaires. Elle forme une étroite lanière paléozoïque encadrée vers l'ouest par deux branches du cisaillement de Quimper-Angers.
 - L'Unité de Saint-Georges-sur-Loire, essentiellement gréseuse comprend quelques phtanites ainsi que des rhyolites et des spilites.
 - L'Unité de Saint-Mars-la-Jaille, est majoritairement gréseuse. Elle contient quelques argilites ainsi que des micaschistes.
 - L'Unité des Landes de Lanvaux est constituée de siltite dans sa plus grande partie ainsi que de quelques grès.

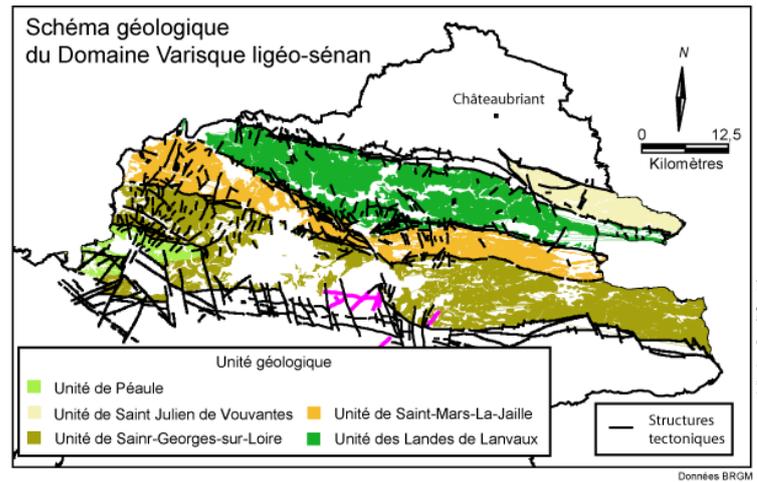


Illustration A2-3 : Schéma géologique du Domaine Varisque ligéro-séan (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchenec, 2007)

- **Le Domaine varisque nantais** est limité à l'est par les failles du Sillon Houiller de Basse-Loire et au sud par le Cisaillement Sud-Armoricain (CSA). Ce domaine est recoupé par différents plutons granitiques varisques ainsi que par des massifs de roches basiques. Il est constitué des six unités suivantes (Illustration A2-4) :
 - Le sillon Houiller de Basse-Loire, se compose d'argilite schisteuse ainsi que de quelques grauwackes, houilles et tufs rhyolitiques.
 - L'Unité de Champtoceaux, est majoritairement constituée d'orthogneiss, de gneiss et de blastomylonite. Elle comprend aussi sur de plus faible superficie des leptynites, des micaschistes ainsi que quelques lentilles d'écolites.
 - L'Unité de Mauves-sur-Loire, composée de micaschiste, contient aussi quelques lentilles d'amphibolite.
 - L'Unité des Mauges est constituée de micaschiste, schiste, d'amphibolite et d'orthogneiss.
 - L'Unité du Bassin d'Ancenis, composée de grès et de poudingue contient aussi quelques calcaires et lydiennes.
 - L'Unité du Haut-Bocage est entièrement constituée de méta-grauwacke.

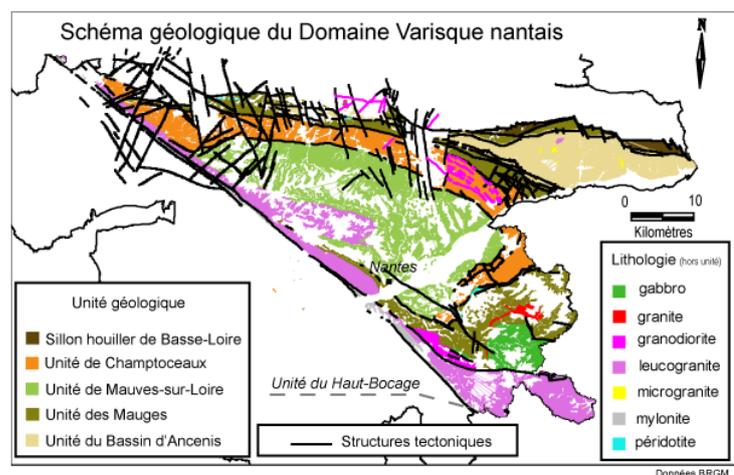


Illustration A2-4 : Schéma géologique du Domaine Varisque nantais (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchenec, 2007)

- **Le Domaine varisque sud-armoricain** est limité au Nord par le Cisaillement Sud-Armoricain. Il est recoupé par d'importants plutons granitiques ainsi que par quelques orthogneiss. Ce domaine comprend huit unités (Illustration A2-5) :
 - Le Sillon Houiller Vendéen est la plus petite unité de ce domaine. Il est entièrement composé d'argilite carbonneuse.
 - L'Unité de Chantonnay est majoritairement constituée de grauwacke et d'orthogneiss.
 - L'Unité de Groix-Céné est essentiellement micaschisteuse. Ces micaschistes sont par endroit recoupés par des lentilles d'amphibolite et de serpentinite.
 - L'Unité de Paimboeuf-Montaigu, constituée de leptynite et d'amphibolite contient aussi quelques micaschistes, mylonites et orthogneiss.
 - L'Unité de Saint-Gilles-La-Vilaine est majoritairement micaschisteuse, elle contient une importante quantité de méta-rhyolite ainsi que quelques orthogneiss et quartzite.
 - L'Unité de Saint-Martin-des-Noyers est dans sa plus grande partie amphibolitique. Ces amphibolites sont entrecoupées par quelques micaschistes.
 - L'Unité de Saint Nazaire/Saint-Brévin est essentiellement migmatitique. Elle contient par ordre de présence, quelques gneiss, anatexite, pyroxénite et amphibolite.
 - L'Unité des Essarts est composée dans sa majorité de gneiss et d'amphibolite. Quelques éclogites, orthogneiss et micaschistes sont cependant présents.

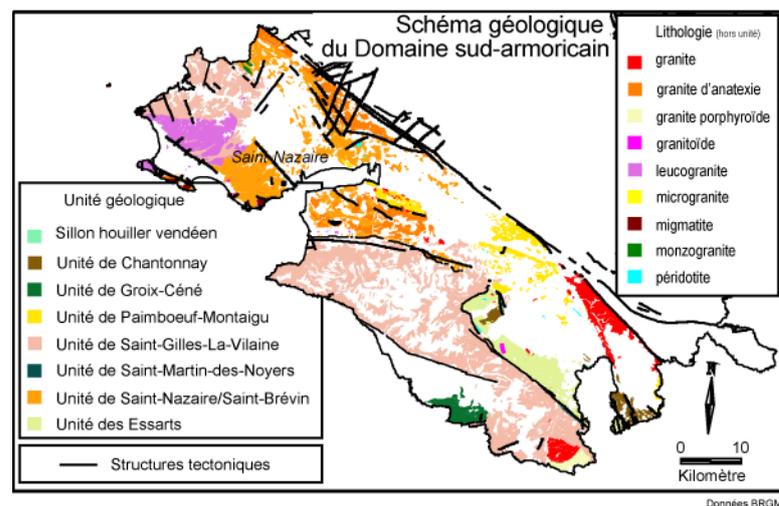


Illustration A2-5 : Schéma géologique du Domaine sud-armoricain (d'après la carte géologique harmonisée 1/ 50 000, Béchennec, 2007)

Comme le montrent ces différents schémas, la cartographie des failles dites mineures n'apparaît pas homogène. Sur certains secteurs, seuls les grands accidents tectoniques ont été représentés. Le nord-ouest du département est le secteur où le plus de failles ont pu être cartographiées.

Annexe 3 – Superficie des formations géologiques de Loire-Atlantique par regroupement lithologique

LITHOLOGIE	Surface Km ²	% de la surface départemental	LITHOLOGIE	Surface Km ²	% de la surface départemental
alluvions	314,7	4,6	kératophyre	0,1	0,0
altérite	263,3	3,9	lamprophyre	0,0	0,0
amphibolite	55,4	0,8	leptynite	39,0	0,6
anatexite	18,3	0,3	leucogranite	257,3	3,8
argile	391,6	5,8	limon	173,9	2,6
argile sableuse	0,3	0,0	lydienne	0,1	0,0
argilite charbonneuse	26,0	0,4	marne calcaire (66<CO3<80)	1,6	0,0
argilite schisteuse	395,3	5,8	marne sableuse	1,9	0,0
argilite silteuse	27,3	0,4	méta-gabbro	0,0	0,0
arkose	1,3	0,0	méta-grauwacke	2,4	0,0
blastomylonite	59,3	0,9	méta-rhyolite	104,1	1,5
brèche	0,1	0,0	méta-siltite	0,3	0,0
calcaire	1,9	0,0	micaschiste	459,0	6,7
calcaire argileux (80%<CO3<90%)	0,0	0,0	micaschiste à silicates d'alumine	5,7	0,1
calcaire bioclastique	0,0	0,0	micaschiste feldspathique	351,3	5,2
calcaire construit	0,2	0,0	microconglomérat	6,0	0,1
calcaire gréseux	1,4	0,0	microdiorite	0,0	0,0
calcaire sableux	30,6	0,4	microgranite	3,1	0,0
cipolin	0,2	0,0	miarite	140,7	2,1
colluvions	427,9	6,3	monzogranite	2,3	0,0
conglomérat	0,6	0,0	mylonite	37,8	0,6
cornéenne	0,2	0,0	orthoquartzite	168,9	2,5
dolérite	0,1	0,0	pegmatite	0,8	0,0
éclogite	1,8	0,0	péridolite	7,5	0,1
falun	2,5	0,0	petits cailloux	95,1	1,4
gabbro	37,6	0,6	phthanite	53,3	0,8
gneiss	85,1	1,2	poudingue	21,2	0,3
gneiss leptynitique	10,4	0,2	proxénite	1,4	0,0
gneiss miaritique	26,7	0,4	quartz filonien	4,7	0,1
gneiss ocellé	0,6	0,0	quartzite	28,0	0,4
granite	71,2	1,0	remblais	26,8	0,4
granite d'anatexite	93,5	1,4	rhyolite	2,6	0,0
granite porphyroïde	10,2	0,2	sable	381,6	5,6
granitoïde	0,7	0,0	sable fin	3,6	0,1
granodiorite	14,2	0,2	schiste	14,1	0,2
graphite	1,0	0,0	schiste albitique	23,3	0,3
grauwacke	20,4	0,3	schiste ardoisier	92,2	1,4
grave	29,8	0,4	schiste noir	0,0	0,0
graviers	119,1	1,7	schiste vert	4,5	0,1
grès	375,7	5,5	schistes ampéliteux	0,0	0,0
grès feldspathique	0,2	0,0	serpentinite	0,1	0,0
grès fin	1,4	0,0	siltite	400,4	5,9
grès grossier	8,1	0,1	siltite argileuse	21,9	0,3
grès micacé	66,1	1,0	siltite gréseuse	71,0	1,0
grès quartzite	212,3	3,1	spilite	5,5	0,1
grès siliceux	6,1	0,1	tourbe	258,7	3,8
houille	0,6	0,0	tuf rhyolitique	0,3	0,0
jaspe	0,0	0,0	vase	324,8	4,8
Somme des surfaces des lithologies potentiellement enrichies (Km ²)	2193,7	32,2	Loire-Atlantique (Km ²) :	6809,8	

Tableau A3-1 : Lithologies présentes dans le département de Loire-Atlantique (les lithologies surlignées correspondent aux lithologies présentant des enrichissement en As, Pb, Cu ou Zn dans les massifs hercyniens métropolitains, hors massif armoricain).

Annexe 4 – Liste des pollutions potentielles en arsenic, cuivre, plomb et zinc dans les sols en bordure d'exploitation minière sur le territoire métropolitain

Source : Greffié C., Artignan D., Deschamps Y. et Itard Y. (2004). Caractérisation des pollutions potentielles relatives aux sites miniers du territoire français métropolitain, Rapport final. BRGM/RP-52816-FR, 55 p., 2 fig., 7 tabl., 4 ann.

Exploitation	Polluants majeurs				Polluants accessoires				Polluants occasionnels			
Au1	As					Cu	Pb	Zn				
Au2	As					Cu		Zn			Pb	
Au3	As					Cu	Pb	Zn				
Au5					As	Cu					Pb	Zn
Cu1	As	Cu					Pb	Zn				
Cu2		Cu	Pb	Zn								
Zn1			Pb	Zn								
Zn2	As	Cu	Pb	Zn								
Zn3		Cu	Pb	Zn	As							
Sb1	As			Zn		Cu					Pb	
Sn1					As	Cu		Zn				
Sn2		Cu			As		Pb	Zn				
Sn3		Cu										
Fe2			Pb	Zn		Cu						
Al1					As							
Mn1					As	Cu						
U1						Cu	Pb		As			Zn
U2												
W1	As	Cu					Pb	Zn				
W2			Pb		As	Cu	Pb	Zn				
BaF1					As	Cu		Zn				

Annexe 5 – Gisements, gîtes et indices de minéralisation à l'arsenic, au cuivre, au plomb et au zinc en Loire-Atlantique

(Données BRGM, <http://sigminesfrance.brgm.fr>)

N° fiche	Nom du site	Commune	Minéralisation	Morphologie	Gîtologie
FRA-00030	Pontpéan	SAINT-PHILBERT-DE-GRAND-LIEU	Pb, Zn, Ge	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements filoniens mésothermaux
FRA-00078	Abbaretz - Nozay (district)	ABBARETZ	<u>Sn</u> -W, (Cu, Bi, Sb , métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-00173	L'Ecarpière	GETIGNE	<u>U</u> , (Fe, Cu, Pb, Zn, Se)	Champ de filons discordants	Gisements d'uranium "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement
FRA-00184	Le Chardon	GEORGES	<u>U</u> , (Fe, Cu, Pb, Zn, Se)	Champ de filons discordants	Gisements d'uranium "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement
FRA-00203	Pennaran (Pen Ar Ran)	PIRIAC-SUR-MER	<u>U</u> , (Fe, Cu, Pb, Zn, Se)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements d'uranium "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement
FRA-00256	La Babinais	VRITZ	<u>Au, Zn, As, Sb, Cu, Ni, Co</u>	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements syn-orogéniques à tardi-orogéniques, en relation avec des failles
FRA-00262	La Haie Claire	LA CHAPELLE-SAINT-SAUVEUR	Zn, Pb, Cu , (<u>Au, Ag, Sn, Sb, Bi</u>)	Amas et lentille stratiformes	Amas sulfurés volcanogéniques (VMS) de type Phanérozoïque à Zn-Pb-Cu (Kuroko)
FRA-00267	La Rousselière	MESANGER	Cu, Au, Mo, Sn, Ag, W, Pb, Zn, etc.)	Enveloppe discordante de minerai disséminé	Gisements porphyriques
FRA-00279	Le Plessis (44)	JOUE-SUR-ERDRE	Pb, Zn , (Ag, Ba) <u>Au</u>	Enveloppe concordante à sub-concordante de minerai disséminé	Gisements exhalatifs-sédimentaires à sulfures massifs (Sedex)
FRA-00327	Teillé	MESANGER	<u>Zn, Pb, Cu</u> , (Au, Ag, Sn, Sb, Bi)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Amas sulfurés volcanogéniques (VMS) de type Phanérozoïque à Zn-Pb-Cu (Kuroko)
FRA-00329	Vay	VAY	<u>Au, Zn, As, Sb, Cu, Ni, Co</u>	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Gisements syn-orogéniques à tardi-orogéniques, en relation avec des failles
FRA-00353	Crossac	CROSSAC	Zn, Pb , Ag, Cu ("BPGC") et/ou F, Ba	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Filons et brèches silicifiées liés à des failles cassantes

FRA-00354	Piriac 1	PIRIAC-SUR-MER	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-00361	La Chenaie-1	ABBARETZ	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-00362	La Bertellerie	MARSAC-SUR-DON	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm)	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-00363	Le Bé	NOZAY	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm)	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-02098	Beslé	GUEMENE-PENFAO	<u>Au</u> , (Ag, W, As , Sb, Cu , Ni, Co, Bi, Te)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements d'or "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement ductile-cassant (faciès schiste vert)
FRA-02122	La Branchère	PETIT-AUVERNE	<u>Au</u> , (Ag, W, As , Sb, Cu , Ni, Co, Bi, Te)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements d'or "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement ductile-cassant (faciès schiste vert)
FRA-02124	Le Pin	LE PIN	<u>Au</u> , (Ag, W, As , Sb, Cu , Ni, Co, Bi, Te)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements d'or "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement ductile-cassant (faciès schiste vert)
FRA-02125	Moisdon	MOISDON-LA-RIVIERE	<u>Au</u> , (Ag, W, As , Sb, Cu , Ni, Co, Bi, Te)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements d'or "mésothermaux" liés à des zones de cisaillement ductile-cassant (faciès schiste vert)
FRA-02165	Orvault	ORVAULT	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-02636	L'Effeterie	SAINT-MARS-DE-COUTAIS	Au, Zn , As , Sb, Cu , Ni, Co	Forme atypique, quelconque ou indéfinie	Gisements syn-orogéniques à tardi-orogéniques, en relation avec des failles
FRA-03047	La Rouxière	VARADES	Au, Ag, (As , Sb, Hg)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements en veines et disséminés de remplacement encaissés dans des sédiments (Carlin)
FRA-03048	Belligné	BELLIGNE	Au, Ag, (As , Sb, Hg)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements en veines et disséminés de remplacement encaissés dans des sédiments (Carlin)

FRA-03114	Saint Sébastien (44)	SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	Sn-W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base) <u>Li</u>	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-03336	Kerden	Le POULIGUEN	Pb-Zn-Cu , (Ag, Ge, U)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Filons polymétalliques péritholithiques
FRA-03660	Couffé	COUFFE	Au et/ou <u>Sb</u> , (Cu , As , Bi, Te, W, B, F, Sb, Hg, Ag)	Enveloppe concordante à sub-concordante de minerai disséminé	Gisements liés à des failles cassantes (faciès de très faible degré métamorphique)
FRA-03686	Batz-sur-Mer	BATZ-SUR-MER	Au et/ou <u>Sb</u> , (Cu , As , Bi, Te, W, B, F, Sb, Hg, Ag)	Filon ou veine (puissance > 50 cm), en champ ou isolé, discordant	Gisements liés à des failles cassantes (faciès de très faible degré métamorphique)
FRA-03794	Beaulieu	NOZAY	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm), discordant sur les strates	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-04081	La Touche - 1	PONTCHATEAU	<u>Sn</u> -W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Stockwerk (ou réseau) de filonnets ou veinules (puissance < 50 cm)	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques
FRA-04108	La Ricotière	CHAUVE	Sn-W, (Cu , Bi, Sb, métaux de base)	Enveloppe concordante à sub-concordante de minerai disséminé	Filons et stockwerks ("greisen") granitiques et péri-granitiques

Annexe 6 – Comparaison de l'extension des formations superficielles allochtones entre les cartes géologiques (1/50 000) et pédologique (1/250 000) de Loire-Atlantique

1- Formations superficielles : Définition

Récente, la notion de formations superficielles a fait l'objet au cours des dernières années de plusieurs définitions. Ainsi, dans certains ouvrages de synthèse générale « Géologie des formations superficielles » (1989) ou « Géologie de la surface » (2003), les formations superficielles apparaissent pour Campy et Macaire (auteurs de ces ouvrages) comme inféodées au relief actuel et donc nécessairement récentes (Quaternaire), ce qui, à leurs yeux, exclut du concept les paléo altérites et les dépôts continentaux anciens enregistrés dans la pile sédimentaire.

Sur les cartes géologiques au 1/50 000, réalisées pour la plupart entre les années 1975 et 1990, le terme de 'formations superficielles' qualifie l'ensemble des dépôts quaternaires. Elles prennent aussi en compte certains dépôts complexes du tertiaire, peu consolidés, d'épaisseur réduite associant argiles, limons, sable et cailloutis de quartz. Dans les vallées, elles se composent d'alluvions anciennes et récentes et de colluvions variés. Enfin, les dépôts d'épaisseurs variables conservés par exemple sous formes d'argiles plus ou moins sableuses qui correspondent aux altérites des formations du socle sous-jacent sont également répertoriés en tant que formations superficielles. Cependant, les dépôts continentaux anciens de la pile sédimentaire ('couverture sédimentaire') ne sont pas considérés dans le terme de formations superficielles. On a ainsi une dissociation marquée entre les deux termes.

Wyns (2007) propose d'élargir les notions de formations superficielles à l'ensemble des périodes géologiques et donc de prendre aussi en compte les formations superficielles anciennes, postérieurement fossilisées. Dans ce sens, il inclut dans les formations superficielles « toutes les formations géologiques affleurant dont la genèse ou les propriétés actuelles résultent de processus supergènes, quel que soit leur âge », rapportant ainsi les 'couvertures sédimentaires' tertiaires de la carte géologique comme formations superficielles.

A la suite de cette évolution conceptuelle, selon un groupe de travail du BRGM (Prognon *et al.*, 2009), la dénomination de 'formations superficielles' intègre désormais non seulement les formations sédimentaires quaternaires (limons, colluvions et alluvions) mais aussi les formations résiduelles (ou altérites) quel que soit leur âge (Tableau A6-1).

Par leur relation au substratum, on peut regrouper deux grands types de formations superficielles :

Les formations superficielles autochtones, définies comme ayant évolué sur place à partir d'une roche dont elles dérivent, reposent sur un « substrat origine », que l'on peut également appeler roche-mère, puisqu'il y a filiation entre roche et matériaux meubles. Leur développement résulte des processus de désagrégation, d'altération (altération soustractive par lessivage) ou de cuirassement (altération additive par accumulation chimique) du substratum géologique. Les formations superficielles autochtones deviennent des sols si leur évolution se fait en présence de matière organique et d'êtres vivants.

Les formations superficielles allochtones, qui ont subi, ou subissent encore des déplacements, proches ou lointains, ne reposent plus sur leur roche d'origine mais transitent puis s'immobilisent sur un « substrat support ». C'est le cas des colluvions, des alluvions, des moraines et des limons de plateaux. Le contact entre formations superficielles et substrat support se marque par une discontinuité qui peut-être plus ou moins nette. Evidente la plupart du temps dans le cas des formations allochtones où la discontinuité est soulignée par une modification minéralogique (loëss sur granite ou calcaire par exemple), elle est plus difficile à déceler dans le cas de formations transitant sur un versant où affleure un substrat de composition minéralogique homogène, de l'amont vers l'aval. Les formations allochtones sont des sédiments tant que dure leur transit. Elles peuvent être pédogénésées après immobilisation et fixation par la végétation et sont alors les roches mères pour ces sols.

FORMATIONS NATURELLES AUTOCHTONES

Formations résiduelles ou altérites	Formations d'origine chimique	Formations d'origine organique
Altérites soustractives (lessivage) Latérites et bauxites Argiles et sables de décarbonatation <ul style="list-style-type: none"> ▪ Formations à silicification ▪ Terra fusca, terra rossa Cargneules	Tufs et travertins Accumulation ferromanganique	Constructions et sédiments organogènes Accumulation de matière organique
Altérites additives (concentration) Silicifications <ul style="list-style-type: none"> ▪ Silcrêtes ▪ Meulières Croûte calcaire Croûte évaporitique		

FORMATIONS NATURELLES ALLOCHTONES

Formations gravitaires	Formations hydrodynamiques	Formations éoliennes	Formations glaciaires	Formations périglaciaires
En masse Rapide <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépôts d'avalanche de débris ▪ Brèches d'écroulement ▪ Dépôts de glissement Lent <ul style="list-style-type: none"> • Dépôts soliflués • Colluvions 	Formations fluviales Formations alluviales Formations fluvio-lacustres Formations fluvio-marines Formations fluvio-glaciaires	Accumulations sableuses Dunes Sables de couverture	Formations glaciaires franches ou morainiques	Glaciers rocheux
Granulaires Brèche de pente Eboulis	Formations lacustres et palustres	Accumulations limoneuses Loess Limons éoliens et limons des plateaux	Formations fluvio-glaciaires	Eboulis périglaciaires 'francs'
Gravité indifférenciée	Formations marines		Formations glacio-lacustres	

Tableau A6-1 : Classification des formations naturelles autochtones et allochtones (Prognon et al., 2009)

2- Données géologiques

2.1- Origine et qualité des données géologiques départementales

Le département de la Loire-Atlantique est couvert par 25 cartes géologiques au 1/50 000 (Tableau A6-2) qui ont servi à l'élaboration de la carte départementale harmonisée (Béchenec, 2007). Cette dernière a été utilisée pour la localisation des formations superficielles. Les notices des cartes ont servi à décrire les lithologies des formations superficielles. Parmi l'ensemble, 21 cartes ont été éditées entre 1969 et 1998, époque où les objectifs d'une cartographie étaient différents d'aujourd'hui.

Dans les années 1960, les cartes géologiques ont été établies pour améliorer les connaissances du sous-sol. Elles ont été utilisées par la suite pour l'exploitation des matières premières. Par exemple, les altérites et les formations superficielles n'étaient alors pas prises en compte et de fait non cartographiées. Certaines de ces cartes évoquent la présence d'altérites sur des formations, mais elles ne sont jamais cartées ou alors elles sont cartées comme 'altérites indifférenciées'.

La représentation des formations superficielles s'avère ainsi très hétérogène de part et d'autre du département. Certaines formations, comme les altérites sont représentées en grande partie sur une carte et à peine sur celle d'à côté. C'est également le cas pour la cartographie des formations superficielles.

N°	Nom de la carte	Année de parution
387	Pipriac	1995
388	Bain de Bretagne	1987
389	Châteaubriant	1988
419	Redon	1984
420	Nozay	1987
421	Saint-Mars-La-Jaille	1988
422	Segré	1998
449	La Roche-Bernard	1975
450	Savenay	1988
451	Nort-sur-Erdre	1983
452	Ancenis	1978
453	Chalonnnes-sur-Loire	1970
479	Saint-Nazaire	1973
480	Paimboeuf	1978
481	Nantes	1969
482	Vallet	1969
506/533	Ile de Noirmoutier/Pointe de Saint Gildas	1978
507	Machecoul	1978
508	Saint-Philbert-de-Grand-Lieu	1979
509	Clisson	1982
534	Challans	1983
535	Palluau	2009
536	Montaigu	2006



Tableau A6-2 : Assemblage des cartes géologiques, au 1/50 000, dans le département de Loire-Atlantique (44)

Dans le but d'évaluer la qualité des données disponibles liées aux formations du régolithe, deux cartographies distinctes de la qualité de l'information ont été élaborées par le BRGM (Prognon *et al.*, 2009) : une carte intéressant les formations autochtones du régolithe (Figure A6-1) et une carte représentative des formations allochtones du régolithe (Figure A6-2). Ces cartes s'appuient sur une évaluation semi-quantitative de la qualité de l'information basée sur cinq critères précisés dans le Tableau A6-3.

Indice de confiance	Qualité de l'information	Critères
0	Pas d'information	Absence d'information
1	Faible	Géologie de la surface renseignée mais lithologie incertaine, informations fragmentaire
2	Moyenne	Géologie de la surface renseignée (uniquement la lithologie), informations partielles, recouvrement sous-évalué, description sommaire
3	Bonne	Géologie de la surface renseignée (lithologie et âge)
4	Très bonne	Géologie de la surface renseignée (lithologie, âge et âge du protolithe)

Tableau A6-3 : Critères reconnus par le BRGM (Prognon *et al.*, 2009) pour l'évaluation de la qualité de l'information géologique sur les formations du régolithe à l'échelle du 1/50 000

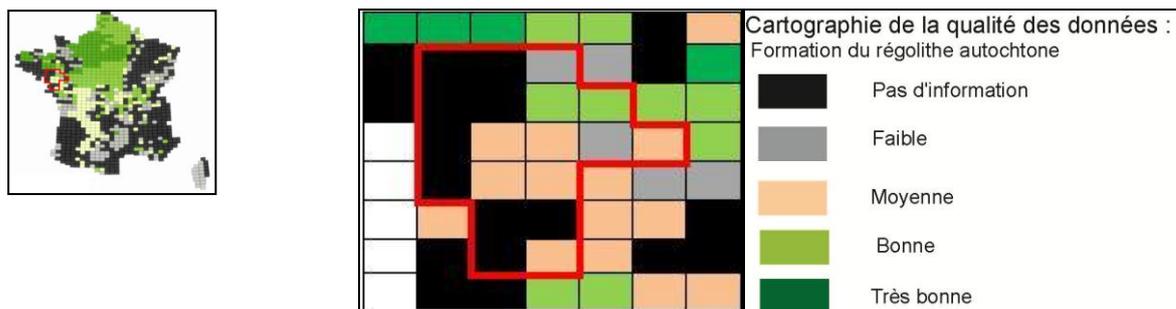


Figure A6-1 : Cartographie de la qualité de l'information concernant les formations autochtones du régolithe (Prognon et al., 2009)

On observe que dans le département, seulement deux cartes renseignent précisément sur les formations autochtones. Le nord-ouest du département ne possède aucune information et le reste se trouve partiellement renseigné, avec des recouvrements très souvent sous-évalués.

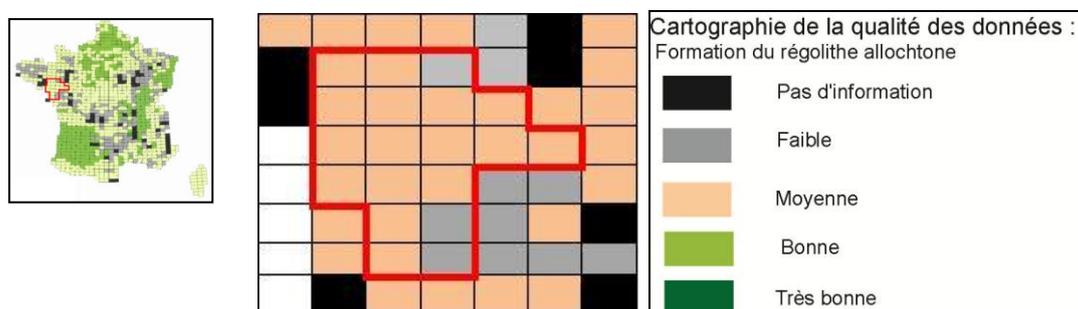


Figure A6-2 : Cartographie de la qualité de l'information concernant les formations allochtones du régolithe (Prognon et al., 2009)

En ce qui concerne les formations superficielles allochtones, la qualité est jugée faible ou moyenne pour l'ensemble du département. Les zones de contours sont probablement raccourcies et sous-évaluées.

Les formations du régolithe sont parfois relevées dans les coupes géologiques collectées dans la BSS (Banque de données du Sous-Sol). Cependant, d'après les auteurs du BRGM (Prognon et al., 2009), les informations sont imprécises ou mal détaillées dans le sens où elles ne renseignent pas sur le type de formation ni sur son mode de genèse ou son âge, mais simplement sur la lithologie (ex : sable, limons, graviers, sol sableux...).

2.2. Répartition des formations superficielles du département

Malgré la qualité globalement médiocre générale de la cartographie des formations superficielles, leur répartition spatiale a été analysée.

Les différents cycles géologiques ont façonné le paysage de Loire-Atlantique en créant des dépressions ou zones d'effondrement, qui ont été recouvertes et comblées, périodiquement, par des dépôts successifs d'origine mixte (marine, fluviale et éolienne). Ces dépôts de surface, datés du tertiaire et quaternaire constituent une couverture relativement dense sur l'ensemble du département. Ils sont qualifiés soit de 'couverture sédimentaire', soit de 'formations superficielles' dans les cartes géologiques.

Les dépôts tertiaires sont caractérisés principalement par des sables, des argiles, des limons, quelques dépôts de faluns et de nombreux dépôts de petits cailloux. Les dépôts quaternaires sont essentiellement composés d'alluvions (dont argiles flandriennes), de colluvions, de sables littoraux, de limons de plateaux ainsi que de dépôts complexes, d'épaisseur réduite, associant argiles, limons, sables et cailloutis.

Le Tableau A6-4 présente les proportions de chaque grand type de formation géologique sur l'ensemble du département de la Loire-Atlantique (superficie totale d'environ 6910 km²), en s'appuyant sur la carte géologique harmonisée (Béchenec, 2007).

Superficie (%)	Type de géologie
56,97	Substrat géologique
25,2	Formations superficielles
12,4	Couverture sédimentaire
3,9	Altérites
1	Réseau hydrographique
0,53	Dépôts anthropiques

Tableau A6-4 Pourcentage surfacique par grand type de formation géologique sur le département de la Loire-Atlantique

La Loire-Atlantique apparaît recouverte sur un quart de sa superficie par des formations superficielles quaternaires. En intégrant les formations du tertiaire, pour l'essentiel intégrées à la couverture sédimentaire, la superficie totale de ces formations allochtones du régolithe atteint environ 37,6% de la surface du département (Tableau A6-4). Les formations autochtones, correspondant principalement aux altérites paléocènes issues de l'altération du socle sous-jacent, représentent environ 3,9 %. Ces proportions ne sont pas négligeables, d'autant que certaines (altérites, limons par exemple) apparaissent sous-évaluées. Le détail des lithologies concernées par grand type de couverture sédimentaire et de formation superficielle est précisée dans le Tableau A6-5.

Lithologie	Surface (km ²)	% surface départementale	Type de formation
Alluvions	314,7	4,6	Surperficielles
Altérites	263,3	3,8	Surperficielles
Argile	391,6	5,7	Couverture sédimentaire
Argile sableuse	0,3	0,00	Couverture sédimentaire
Calcaire	1,9	0,03	Couverture sédimentaire
Calcaire gréseux	1,4	0,02	Couverture sédimentaire
Calcaire sableux	30,6	0,4	Couverture sédimentaire
Colluvions	427,9	6,2	Surperficielles
Falun	2,5	0,04	Couverture sédimentaire
Grave	29,8	0,4	Couverture sédimentaire
Graviers	119,1	1,7	Couverture sédimentaire/FS
Grès siliceux	6,1	0,1	Couverture sédimentaire
Limons	173,9	2,5	Surperficielles
Marne calcaire	1,6	0,02	Couverture sédimentaire
Marne sableuse	1,9	0,03	Couverture sédimentaire
Petits cailloux	95,1	1,4	Couverture sédimentaire/FS
Sable	381,6	5,5	Couverture sédimentaire/FS
Sable fin	3,6	0,05	Couverture sédimentaire
Tourbe	258,7	3,7	Surperficielles
Vase	324,8	4,7	Surperficielles
Loire-Atlantique	6909,4	41,0	

Tableau A6-5 : Surface et typologie par lithologie des dépôts tertiaires et quaternaires de Loire-Atlantique (issu de la carte géologique harmonisée au 1/50 000, Béchennec, 2007)

2.3. Zoom sur les formations allochtones susceptibles de recouvrir localement les roches de socle

Ce zoom concerne les principales formations allochtones susceptibles de recouvrir localement les roches de socle. Les formations de petite taille (quelques km²) ne sont pas présentées ici.

Revêtements d'interfluves : H, H1 et H2

Cette formation (Figure A6-3) d'origine fluviale regroupe les revêtements de couverture d'interfluves c'est-à-dire les dépôts compris entre deux vallées importantes. Elle couvre 30,7 km² du département. On distingue trois types de revêtements se rapportant au Pléistocène ancien et d'origine continentale.

- Revêtement d'interfluves indifférenciés, sables, cailloutis, argiles : H
- Revêtement d'interfluves de 1 à 7 m de puissance : H1
- Revêtement d'interfluves résiduels et remaniés par éolisation : H2

Certains de ces épandages sont minces et correspondent à des dépôts sableux homogénéisés (H1), tandis que d'autres sont plus épais et correspondent à des dépôts remaniés (H2) associant graviers, limons et argiles (feuille Nort-sur-Erdre, n°451).

Ces revêtements sont localisés au nord-ouest du marais de St-Mars-Du-Désert, autour de la commune d'Héric, en plein centre du département (nord de Nantes).

Ils sont disposés en contrebas de la surface des plateaux, sur les replats qui surplombent les versants de la vallée de l'Erdre (en amont de Nort-sur-Erdre) ou bien ils sont étalés sur les pentes régulières qui convergent vers les bassins de Nort, Safré et Blain.

Dans la région d'Héric, il s'agit surtout de placage de cailloutis dont l'épaisseur ne dépasse pas 1 m. Dans le bassin de Nort-sur-Erdre, on observe le recouvrement des sables pliocènes par ces graviers.

D'un point de vue lithologique cette formation associe des éléments émoussés (sables, graviers et galets) et des matériaux plus anguleux (sables, graves et blocs), d'origine parfois locale issue directement des éléments du substratum. Ces éléments détritiques sont emballés dans une matrice argileuse et limoneuse (10 à 15 % du sédiment) dont la composition est elle-même très influencée par les phyllites du substratum (feuille Nort-sur-Erdre n°451).

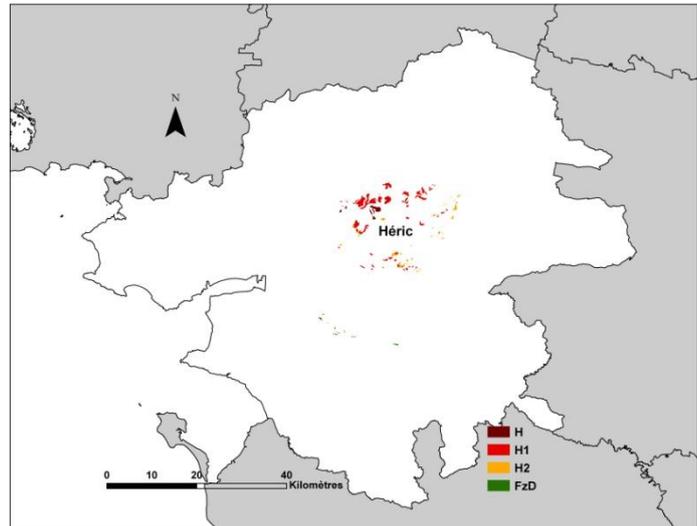


Figure A6-3 : Répartition des revêtements d'interfluves

Petits cailloux du Pliocène : RB(q), p-IV, p-IV/g1b(c), p-IV/g1b(mc), p-IV/e6-g1a, p-IV/e7, p-IV/e5b(a)

Cet ensemble (Figure A6-4) couvre au moins 95 km². Il s'agit d'une formation fluviale de piémont qui constitue un recouvrement de petits cailloux d'origine continentale. Remontant au Pliocène et Quaternaire, elle englobe également les concentrations d'éléments résiduels de quartz dans une matrice argileuse.

Cet ensemble affleure essentiellement au centre du département, dans la partie sud-ouest de la feuille de Nozay et notamment sous la forêt du Gâvre. Un petit lambeau subsiste dans la dépression de Bréhaim en Conquereuil.

Leur répartition montre que ces formations de cailloutis sont indépendantes du réseau hydrographique actuel (feuille de Nozay, n°420) et on les rencontre la plupart du temps sur les sables pliocènes ou sur le substrat paléozoïque dont ils remanient les éléments altérés.

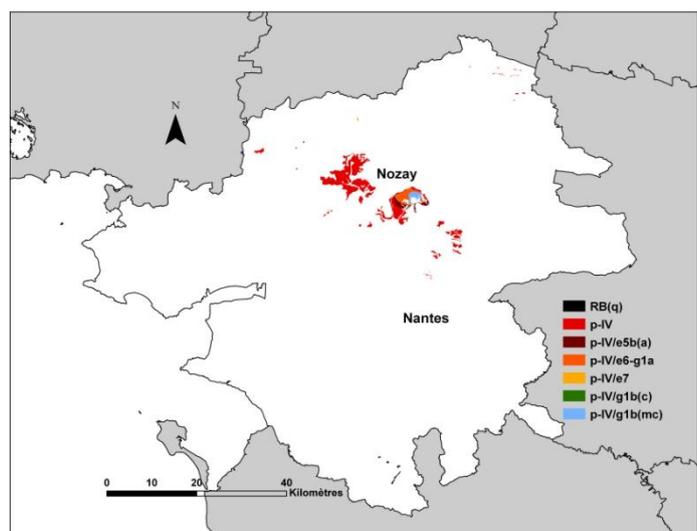


Figure A6-4 : Répartition des petits cailloux pliocènes

Limons des plateaux : B(s), B (sg), B/p-IVS, OE, OE/p-IVG, OE/p-IVS, p/IVL

Les limons de plateaux forment des mélanges entre une granulométrie très fine, typique d'une texture limoneuse, et des éléments grossiers (graviers et cailloutis de quartz centimétriques). Ces dépôts sont d'origine continentale éolienne, transportés au cours du Cénozoïque et du Quaternaire par les vents.

- Formations complexes des plateaux : B
- Limons riches en sables : B(s)
- Limons sableux à galets de quartz : B (sg)
- Limons sur sables et graviers plio-quaternaires : B/p-IVS
- Limons éoliens : OE
- Placage de limons éoliens sur les sables et graviers du bassin de Campbon : OE/p-IVG
- Placage de limons éoliens sur les sables et graviers du bassin de Campbon remaniés : OE/p-IVS
- Plio-quaternaire limoneux : p-IVL

L'ensemble de ces limons se sont déposés au cours du Pléistocène et du Pléistocène supérieur. Ils sont associés aux périodes glaciaire et périglaciaire du Quaternaire. Nous dissociérons ici, les limons d'origine éolienne des limons à dérive granulométrique.

Les limons éoliens sont des sédiments d'origine mixte, souvent complexes qui se rencontrent généralement à la périphérie des aires loessiques où la dynamique éolienne périglaciaire était réduite. Ces dépôts résultent d'un mélange d'argile de décarbonatation de calcaire et de produit de remaniement par ruissellement des placages de particules fines apportés par le vent (Macaire, 1971). Nous pouvons donc regrouper dans cette formation les limons éoliens (OE), les placages de limons éoliens mis en place sur les sables et graviers OE et les limons plio-quaternaires p.

Ces dépôts se sont déposés en abondance, entre autres épisodes, pendant le Würm. Ils sont notamment largement répandus sur le territoire de la feuille de Machecoul, et masquent le socle rocheux. Ces limons très fins recouvrent la surface des plateaux et des interfluves, où ils peuvent atteindre aisément une puissance d'un mètre d'épaisseur. Sur les versants, ils ont la plupart du temps été remaniés et/ou décapés dans les coulées de solifluxion würmiennes et dans les colluvions holocènes. Ils constituent ainsi une partie importante du colmatage flandrien depuis le fond de vallée, vers le coteau.

Au voisinage des bassins pliocènes ou éocènes, les limons s'enrichissent en grains luisants (feuille de Machecoul). Ces grains proviennent du soufflage des poussières arrachés au socle cristallin altéré et des sables éolisés anciens remaniés, formé au début du Quaternaire, en milieu périglaciaire aride. Les minéraux lourds que l'on peut y trouver proviennent des sables pliocènes et des sables étendus sur le plateau continental, exondés en période de bas niveau marin. Ces limons reposent sur des nappes de solifluxion ou sur un mince cailloutis de désagrégation du socle. Ils se sont déposés pendant une période sèche et froide du périglaciaire Würmien.

Les vents dominants avaient une direction Ouest ou Nord/Ouest, comme actuellement. Une partie des limons est aujourd'hui accumulée à la partie supérieure du remblaiement de fond de vallée, sur des alluvions périglaciaires où elle constitue une partie importante du colmatage flandrien.

Sur le massif granitique de Princé, les limons éoliens atteignent un mètre d'épaisseur (la Beusse, le Champblanc, Jarri-Rousse) (feuille de Machecoul). Sur le vaste plateau situé au Nord de Fresnay et de Bourgneuf, la partie en amont des petites vallées disparaît sous la couverture de limons et celle des coulées de solifluxion sous-jacente (feuille de Machecoul).

Les limons à dérives granulométriques correspondent à l'ensemble des limons sableux, ayant été victime d'un tri éolien moins poussé. Cette granulométrie grossière peut également être due à l'enrichissement par des matériaux locaux. Les limons riches en sables et en galets de quartz émoussés et centimétriques en font ainsi partie : B(s), B (sg), B/p-IVS. On retrouve ces limons en recouvrement de plateaux dans le Sud

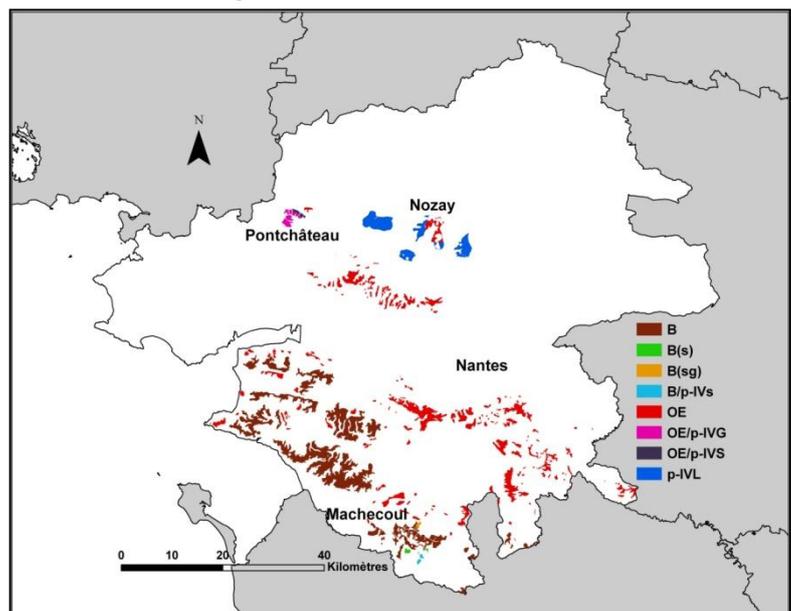


Figure A6-5: Répartition des limons des plateaux

du département et notamment dans les zones de points hauts, où l'érosion ne l'a pas encore atteinte (feuille St-Philbert-de-grand-lieu, n°508). L'épaisseur est variable de 0,20 à 1 m d'épaisseur (la Sublerie, les Poitrières, l'Essart). La nappe de limons repose sur du socle par l'intermédiaire d'une mince couche de cailloutis anguleux que l'on observe sur les surfaces en pente douce. Cependant la fraction sableuse est très éolisée (90 % de grains mats, entre 100 et 800 microns) (feuille St-Philbert-de-Grandlieu, n°508).

3. Données de pédologie

3.1. Origine et nature des données

Le Référentiel Régional Pédologique (RRP), réalisé dans le cadre du programme Inventaire, Gestion, Conservation des Sols (I.G.C.S), a débuté en 2004 et s'est achevé en juin 2008. La carte pédologique de Loire-Atlantique synthétise l'ensemble des connaissances sur la répartition et la nature des grands types de sols (Dubos *et al.*, 2008). Elle s'est appuyée sur les cartes géologiques de Loire-Atlantique au 1/50 000, les cartes topographiques IGN à l'échelle 1/25 000 et des prospections de terrain avec des sondages à la tarière et à la pelle mécanique (fosses pédologiques).

La carte pédologique définit un profil de sol comme l'épaisseur totale du sol ayant une importance du point de vue écologique et au sein de laquelle se manifeste un certain nombre de propriétés qui rendent le sol différent de la roche-mère originelle. Chacune des couches du profil, à propriétés particulières, plus ou moins différentes de celles des couches sus-et sous-jacentes est caractérisée par un horizon.

Elle est structurée en 15 pédopaysages définis par la combinaison de différents critères tels que la géologie, la morphologie et la couverture végétale.

Chaque unité pédopaysagère est constituée d'Unités Cartographiques de Sols (UCS), délimitées à l'échelle du 1/250 000, et comprenant chacune des Unités Typologiques de Sols (UTS). Chaque UCS est donc constituée d'UTS dont l'organisation spatiale et la répartition sont définies et décrites le plus précisément possible.

L'inventaire des Unités Typologiques de Sols (UTS) est effectué suivant les types de sols que l'on peut identifier dans le paysage (Figure A6-6). Les UTS sont chacune décrites par une série de paramètres caractérisant la nature et les propriétés des sols, en surface comme en profondeur : par exemples la texture, le régime hydrique (information complexe, élaborée à partir d'informations pédologiques tels que l'hydromorphie, la profondeur du sol), le matériau parental...

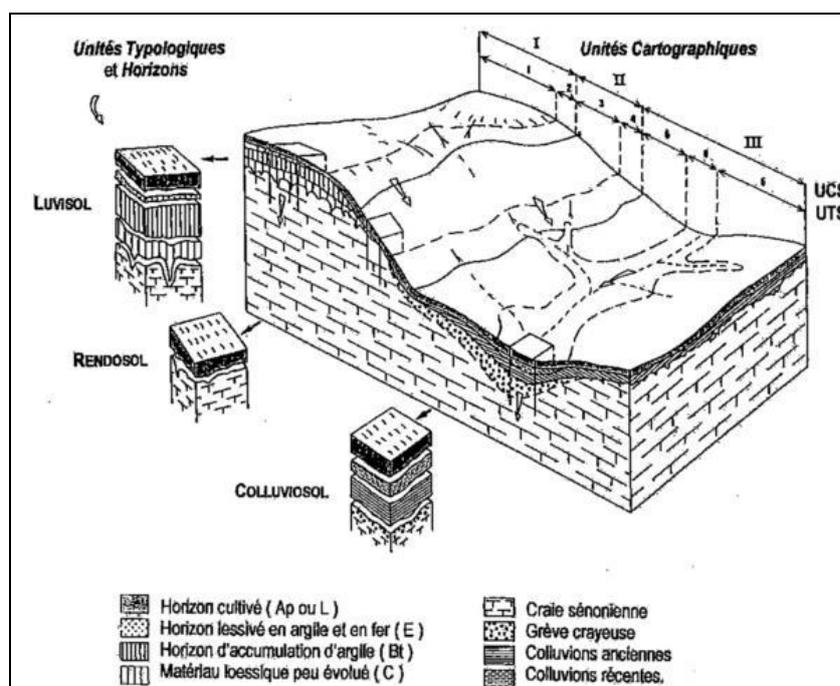


Figure A6-6 : Structuration de la carte pédologique (en unités typologiques et horizons ainsi qu'en unités cartographiques)

Cependant, d'un point de vue cartographique, pour des raisons d'échelle de représentation, les sols sont regroupés au sein d'ensembles cohérents, Unités Cartographiques de Sols (UCS) et ce sont ces ensembles de sols qui constituent la carte. A l'intérieur d'une unité cartographique, la répartition des sols correspond souvent à un continuum composé d'UTS bien identifiées. Généralement, dans une même unité cartographique, la texture est homogène. Les UCS sont donc décrites par leur géométrie d'une part et par leur composition en terme d'UTS. La géométrie d'une UCS est un ensemble de polygones décrits chacun par leur forme et leur position géographique. Sa composition est un ensemble d'UTS dont on ne connaît que les parts relatives dans l'UCS.

De fait, la carte pédologique est susceptible de diluer cartographiquement certaines informations spécifiques. Cependant, ces informations sont souvent mentionnées dans la notice de la carte pédologique.

Les contours des UCS reposent essentiellement sur des critères intimement liés à la formation des sols : la valeur de pente (MNT, pas de 75 m) et le matériau parental (lithologie - carte géologique BRGM 1/50 000). Ils n'ont pas véritablement de lien avec la profondeur des sols, qui varie entre 0 et plus de 2 mètres (1 m en moyenne).

Il est important de préciser également, qu'une version provisoire de la carte pédologique de Loire-Atlantique a été utilisée, celle-ci devant être affinée par un redécoupage MNT pour faire ressortir quelques éléments liés à la topographie, comme les versants aux sols plus superficiels.

3.2. Typologie des sols du département

Le tableau ci-dessous présente pour l'ensemble des textures de sols, les UCS correspondantes et les superficies.

Texture	UCS	Superficie totale (km ²)
Limoneuse	32, 34, 35, 36, 37, 102 63	1448,6
Sablo-argileuse	71, 101, 82, 92, 132	661,7
Limono-argileuse	21, 22, 33, 40, 41, 42	651,3
Limono-sableuse	11, 12, 13, 31, 91, 81	691,6
Sableuse	61, 66, 75, 76, 121, 131	756,4
Argileuse	23, 151, 152	99,5
Complexe	51, 52, 53, 54, 62, 64, 65, 70, 72, 73, 74, 111, 130, 133, 141, 142, 143	2334,6
Total		6643,6
Surfaces anthropiques	0	265,7
Total département		6909,4

Origine	UCS	Superficie totale (km ²)
Formations superficielles - Quaternaires - Tertiaires - Mélange	51, 52, 53, 54, 61, 62, 63, 64, 65, 121 13, 66, 111 75, 76	2192
Altérites de socle	21, 23, 32, 33, 36, 73, 74, 92, 152 72 (25 %), 151 (35 %)	1744,3
Socle	11, 12, 22, 31, 34, 35, 37, 40, 41, 42, 70, 71, 72 (75 %), 81, 82, 91, 101, 102, 130, 131, 132, 133, 141, 142, 143, 151 (65 %)	2707,3
Total		6643,6
Surfaces anthropiques	0	265,7
Total département		6909,4

Tableau A6-6 : Superficie des sols en fonction de leur texture (en haut) et de leur origine (en bas)

La Figure A6-7 illustre les superficies pour les différentes textures et origines des sols. En dehors des sols complexes, majoritaires, les sols limoneux apparaissent fréquents sur le département (20 %), avec en outre différentes nuances liées au mélange avec des sables (10 %) ou des argiles (10%). A l'opposé des limons, les étendues de sols purement argileux apparaissent très peu présentes (< 2%), l'argile étant généralement rencontrée en mélange avec des limons et/ou des sables. La texture sableuse apparaît bien représentée (10 %), avec comme pour les limons ou les argiles des textures mixtes.

Concernant l'origine des sols, ceux développés sur le substratum géologique sont les plus abondants, avec une partie de sols sur roche de socle massive (près de 40 %) et une partie sur roche de socle altérée (25 %). Le reste (un peu plus de 30 %) correspond aux sols développés sur les formations superficielles, ce qui représente une part importante du département.

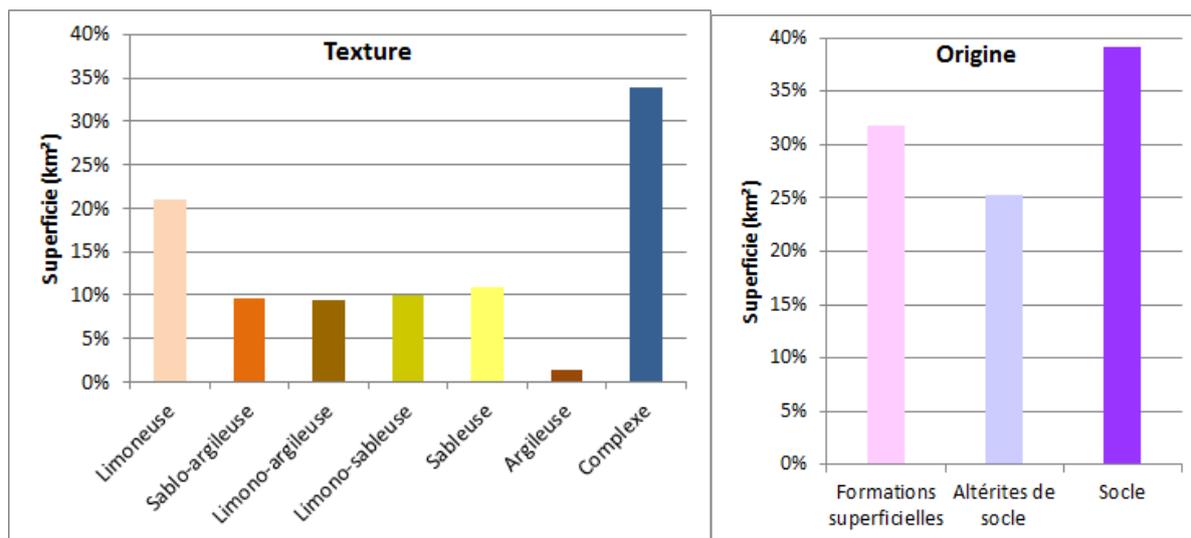


Figure A6-7 : Répartition des sols en fonction de leur texture (gauche) et de leur origine (droite) rapportée à la superficie du département de Loire-Atlantique

Les Figures A6-8 à A6-10 positionnent les principales textures des sols du département selon leur origine : développées sur roches de socle (Figure A6-8), sur altérites (Figure A6-9) et sur formations superficielles allochtones (Figure A6-10).

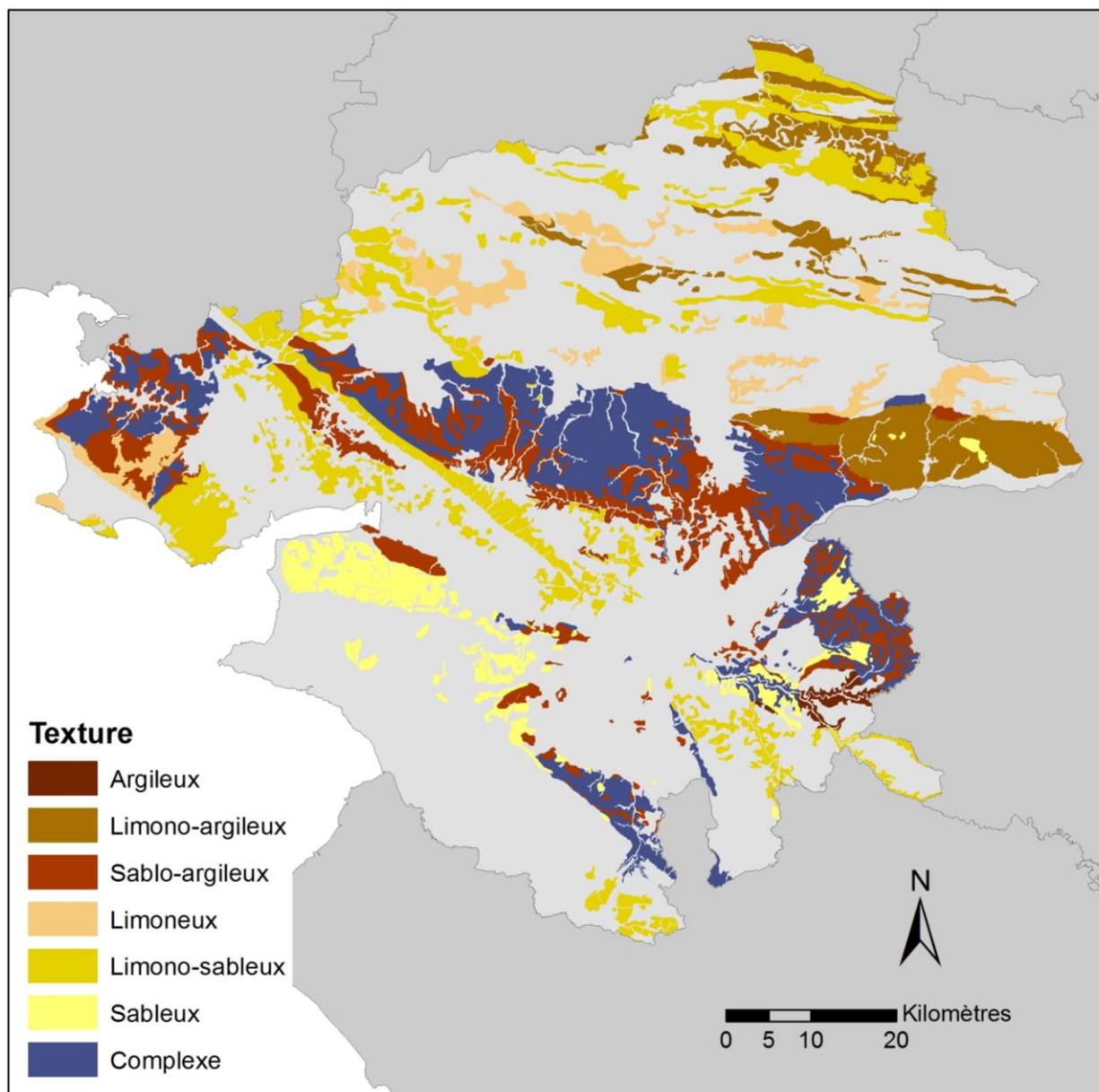


Figure A6-8 : Cartographie des principales textures de sols rencontrées dans le département de la Loire-Atlantique sur roches de socle

Les sols développés sur roches de socle concernent l'ensemble du département où affleurent une grande variété de formations (grès, schistes, micaschistes, gneiss, granites, amphibolites, gabbros, ...). La Figure A6-8 montre une prédominance des textures limoneuses ou limoneuses mixtes, localisées majoritairement dans la moitié Nord du département.

Les sols développés sur les altérites (Figure A6-9) regroupent les sols développés sur roches métamorphiques (schistes, micaschistes) et plutoniques (granites, gabbros du Pallet). Ils se situent au nord de Nantes et au sud du département. On notera que la superficie des altérites considérée par la carte pédologique est nettement plus importante que celle considérée par la carte géologique (facteur 6). La texture limoneuse apparaît majoritaire au Nord du département, alors qu'elle est de type complexe au sud-ouest.

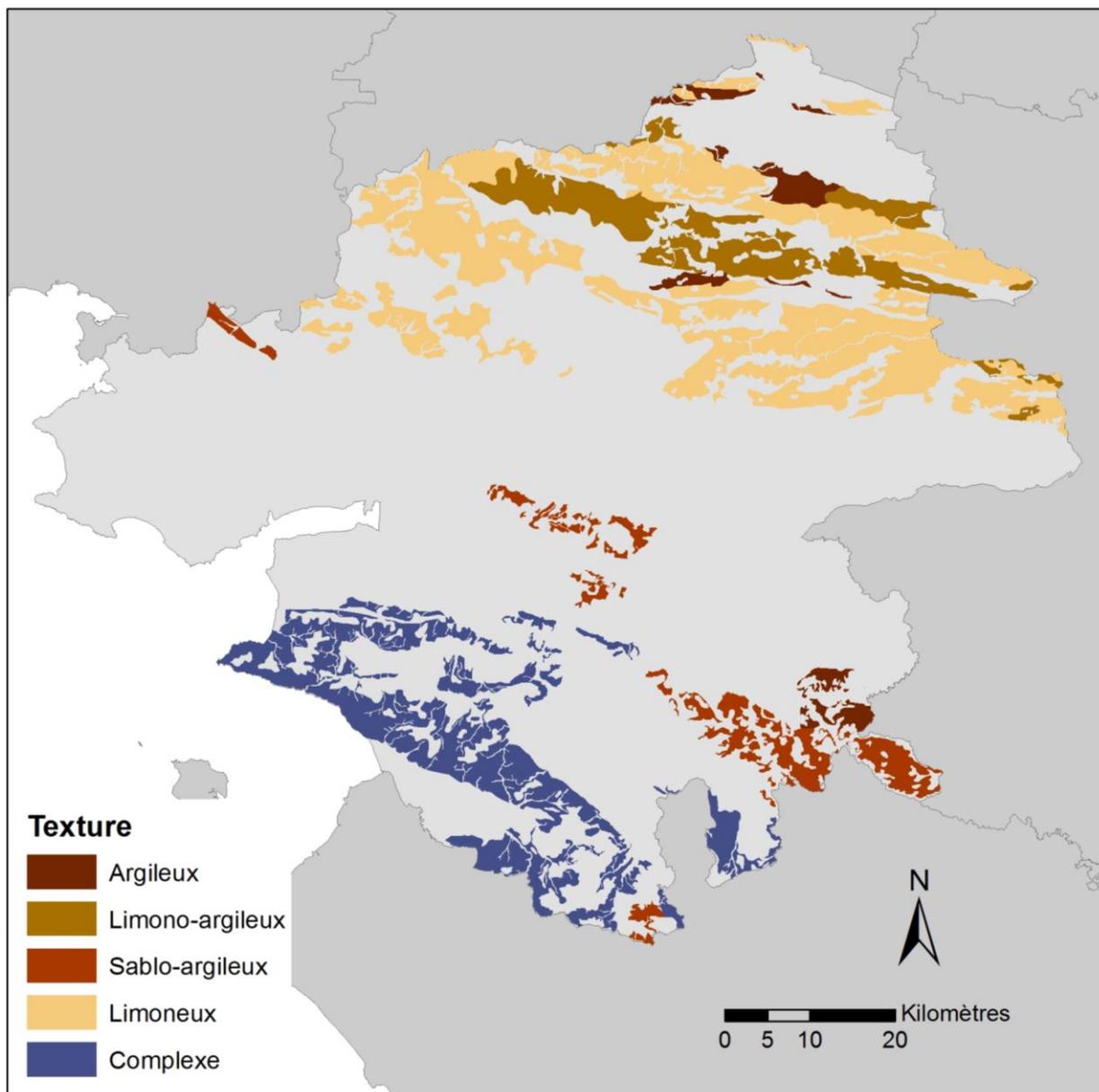


Figure A6-9 : Répartition des principales textures de sols rencontrées dans le département de la Loire-Atlantique pour les sols développés sur les altérites

Les sols développés sur des formations superficielles allochtones (Figure A6-10) incluent des sols hydromorphes développés sur des colluvions, des alluvions et des marais à horizon tourbeux (UCS 51 à 54), associés aux vallées de la Loire, de la Vilaine et de ses affluents, ainsi qu'aux marais doux et aux marais littoraux. Ils regroupent aussi les sols développés sur des matériaux de recouvrement (UCS 61 à 66), ayant en commun l'abondance d'éléments grossiers et la présence de sols à texture grossière. Ces matériaux de recouvrement correspondent aux dépôts issus des successions géologiques transgressives et régressives du Plio-quaternaire. Ces transgressions marines ont comblé les dépressions et déposé des cailloutis, galets et sables et argiles sableuses qui ont souvent protégé les formations sous-jacentes de l'érosion. Elles se situent en position de plateau, de versant ou de comblement de vastes dépressions. Elles sont représentées principalement dans les secteurs de la forêt du Gâvre et en sud Loire, en particulier dans le bassin du lac de Grandlieu. De même que les sols de la bande littorale développés sur les dunes (UCS 121), les sols développés sur des dépôts sableux remaniés situés sur des terrains métamorphiques (UCS 75 et 76) ont également été intégrés à cet ensemble de sols développés sur formations superficielles allochtones. Ils se situent en bordure de la Loire, en amont de l'agglomération nantaise.

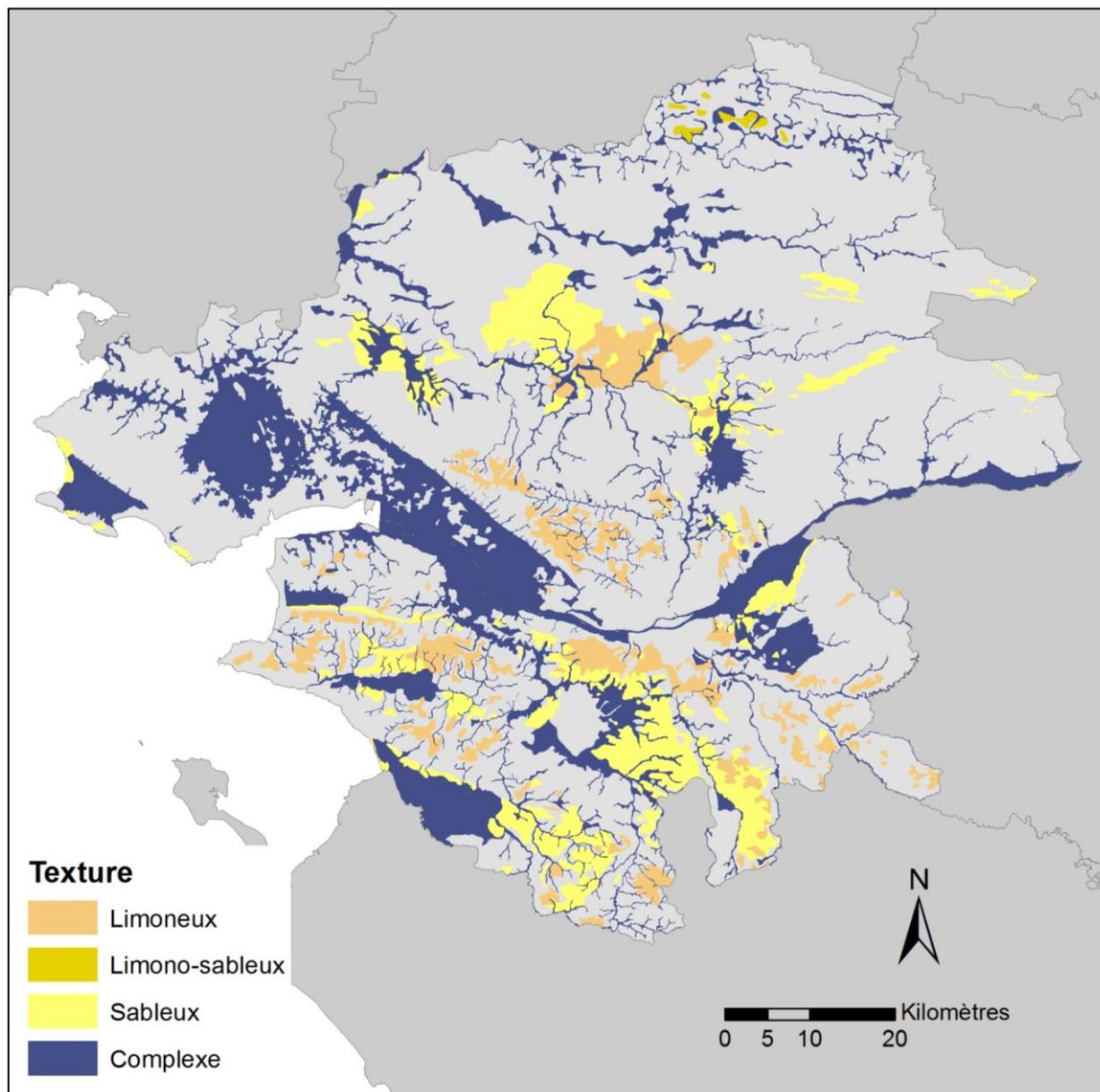


Figure A6-10 : Répartition des principales textures de sols rencontrées dans le département de la Loire-Atlantique pour les sols développés sur les formations superficielles allochtones

Les **principaux pédopaysages et Unités Cartographiques des Sols (UCS)** cités précédemment et formant la carte pédologique au 1/250 000 du département de Loire-Atlantique (44) sont décrits ci-après (Dubos *et al.*, 2008) :

LES PLATEAUX ET VERSANTS SUR GRES

- UCS 11 - Complexe de sols limono-sableux profonds en position de plateau issu de l'altération du grès
- UCS 12 - Sols à texture de limon sableux ou limon sablo argileux avec charge en éléments grossiers moyenne à forte issus de l'altération du grès
- UCS 13 : Complexe de sols développés dans les cuirasses ferrugineuses tertiaires

LES VERSANTS ET DEPRESSIONS SUR SCHISTES ARDOISIERS OU AMPELITES

- UCS 21 - Complexe de sols limono-argileux développés sur les plateaux et versants à faible pente du schiste ardoisier (Schistes d'Angers)
- UCS 22 – Sols limono-argileux développés sur les sommets et versants à pentes régulières du schiste dur.
- UCS 23 – Complexe de sols argileux des bas de pentes et dépressions, issus de l'altération des schistes ardoisiers (schistes d'Angers) ou des Ampélites du Houx.

COLLINES ET VERSANTS SUR MATERIAUX SCHISTO-GRESEUX

- UCS 31 - Complexe de sols issus de l'altération de schistes et grès altérés, sur des sommets ou des débuts de versants.
- UCS 32 - Complexe de sols limoneux issus de l'altération de schistes tendres sur des collines à pente douce.
- UCS 33 : Complexe de sols limono-argileux issus de l'altération kaolinisée de schistes tendres et grès, en place ou remaniée, dans un paysage de pénéplaine.
- UCS : 34 Complexe de sols limoneux issus des schistes tendres et grès, dans un paysage de buttes isolées ou de versants à pente modérée.
- UCS 35 : « Collines à châtaigniers » sur schistes altérés de Marsac sur Don.
- UCS 36 - Sols limoneux hydromorphes des plateaux issus d'altérites ou de schistes, avec parfois intercalations gréseuses.
- UCS 37 – Complexe de sols issus de l'altération des schistes de l'unité de St Georges sur Loire, sur des rebords de plateau.

PLATEAUX ET COLLINES SUR SCHISTES ET GRES BRIOVERIENS ALTERES

- UCS 40 – Sols limono-argileux superficiels développés sur schiste briovérien ou grès, en position de versant abrupt.
- UCS 41 - Complexe de sols limono-argileux issus des schistes et grès briovériens altérés, en position de rupture de pente, versant ou colline.
- UCS 42 – Complexe de sols limono-argileux présentant un début de lessivage, développés sur schiste ou grès briovérien, sur plateaux humides et landes.

COMPLEXE DE SOLS HYDROMORPHES : COLLUVIAUX, ALLUVIAUX ET DE MARAIS

- UCS 51 - Colluvions de pente et têtes de talwegs
- UCS 52 – Alluvions de fonds de vallée – marais doux
- UCS 53 – Complexe de sols à horizons tourbeux
- UCS 54 – Complexe de sols d'origine fluviomarine : marais salants et marais littoraux

COMPLEXE DE SOLS DEVELOPPES DANS DES MATERIAUX DE RECOUVERMENT

- UCS 61 - Complexe de sols des dépôts sableux d'origine plio-quadernaires
- UCS 62 : Complexe de sols de terrasses alluviales.
- UCS 63 : Sols limoneux en position de plateaux.
- UCS 64 : Sols développés sur les dépôts de pente quadernaires.
- UCS 65 : Complexe de sols d'apport de la dépression de Goulaine et de sols développés sur le substrat géologique en place.
- UCS 66 : Sols carbonatés, issus de faluns calcaires du Pliocène, en position de plateau.

LE COMPLEXE DE SOLS SUR ROCHES METAMORPHIQUES

- UCS 70 : Sols superficiels développés sur versants abrupts, sur micaschiste ou roches métamorphiques.
- UCS 71 : Complexe de sols peu profonds, sablo-argileux, issus de micaschiste ou roches métamorphiques, en position de buttes, collines, interfluves et rebords de plateau.

- UCS 72 - Complexe de sols approfondis issu de l'altération de micaschiste ou de roches métamorphiques, sur les plateaux humides et les landes.
- UCS 73 : Complexe de sols sur les séries de micaschistes et schistes de St Gilles.
- UCS 74 : Complexe de sols développés sur les schistes porphyroïdes de St Michel Chef Chef.
- UCS 75 : Complexe de sols sableux peu épais à charge grossière, issus de dépôts sableux remaniés sur micaschiste dur, en position de versant à pente moyenne à forte.
- UCS 76 : Complexe de sols sableux hydromorphes, issus de dépôts sableux remaniés sur micaschiste, en position de plateau à dépressions.

LES BUTTES ET ILES DELIMITEES PAR LE MARAIS ET LES DEPOTS EOCENES DU TRIANGLE

« SILLON/LOIRE/BRIERE »

- UCS 81: Sols développés sur gneiss en position de buttes.
- UCS 82: Sols développés sur les buttes de granite à biotite

LE SILLON DE BRETAGNE

- UCS 91 – Sols peu profonds sur granite en position de rupture de pente et de versant à pente moyenne à forte.
- UCS 92 – Sols approfondis sur granite, en position de pente faible ou de plateau.

LES LONGS PLATEAUX BOSSELES, DEVELOPPES SUR LE LEUCOGRANITE DE GUERANDE

- UCS 101: Complexe de sols sur pentes douces, longues et bosselées, développés sur l'altération du granite.
- UCS 102 : Complexe de sols développés sur les landes sèches sur le granite.

LES BASSINS SEDIMENTAIRES

- UCS 111 – Complexe de sols sur matériaux éocène et oligocène

LA BANDE LITTORALE

- UCS 121: Sols développés sur les dunes littorales.

PLATEAUX BOSSELES DES SECTEURS GRANITIQUES ET DES AUREOLES METAMORPHIQUES ASSOCIEES

- UCS 130 : Sols superficiels développés sur gneiss ou micaschistes indifférenciés.
- UCS 131 : Complexe de sols sur granites et ortho-gneiss indifférenciés.
- UCS 132 : Complexe de sols développés sur roches métamorphiques à dominante d'amphibolites, de leptynites ou de "roches vertes".
- UCS 133 : Complexe sols développés sur gneiss ou micaschiste indifférenciés.

PLATEAUX ET VERSANTS DEVELOPPES SUR GNEISS ET LEPTYNITES ENTRE L'ERDRE ET LA LOIRE.

- UCS 141 : Sols superficiels, développés sur leptynites ou gneiss en position de versant abrupt.
- UCS 142 : Sols développés sur leptynites ou gneiss, peu à moyennement profonds, peu évolués, en position de butte ou de versant doux.
- UCS 143 : Sols approfondis, développés sur leptynites ou gneiss, en position de plateau humide ou lande.

PLATEAUX ET VERSANTS DEVELOPPES SUR LES GABBROS DU PALLET

- UCS 151 : Complexe de sols peu épais, issus du gabbro, en position de versant à pente moyenne à forte.
- UCS 152 : Complexe de sols issus de l'altérite de gabbro, en position de plateau ondulé.

4. Comparaison des cartes géologiques et pédologiques

Le tableau A6-7 corrèle les formations superficielles similaires des cartes géologique et pédologique. Les superficies sont répertoriées pour chaque lithologie. La Figure A6-7 illustre ces différences surfaciques entre les deux cartes.

Comparaison	Formation	Unités cartographiques de sols (Carte pédologique)	Code	surface (km²)	Formations superficielles (Carte géologique)	Code	surface (km²)
1	Tourbes	53 : Complexe de sol à horizon tourbeux	53	223,94	Tourbes	FzT, FzT/e5	258,7
2	Alluvions	62 : Complexe de sols des terrasses alluviales. 52 : Sols développés sur des alluvions de fonds de vallée et marais doux	62	33,88	Alluvions fluviatiles anciennes	Fy-Fx-Fw	114,8
			52	429,15	Alluvions fluviatiles récentes et actuelles	Fz, FzMae1Mu	314,7
					Alluvions fluvio-lacustres de Grand-Lieu	FLz	40,7
			Total	463,03		Total	470,2
3	Colluvions	51 : Sols développés sur des colluvions de pente et tête de talwegs	51	138,63	Colluvions de fond de vallon et dépôts de pente	CFx-y, C(C), Hs	14,8
4	Littoral	121 : Sols développés sur la bande littorale	121	10,1	Dunes et cordons littoraux	Mz-y-x, D	24,1
5	Fluvio-marin	54 : Complexe de sols d'origine fluvio-marine – marais salants et marais littoraux.	54	281,06	Formations allochtones d'origine marine	Mzb	85,6
					Alluvions fluvio-marines de la Loire	FMz	196,4
					Les dépôts marins de la Vilaine entre Redon et Rieux	Mz(v)	25,7
					Total	Total	307,7
6	Limon des plateaux	63 : Sols limoneux en position de plateaux.	63	353,69	Plio-Quaternaire limoneux	p-IVL	35
					Placage de limons éoliens sur les sables et graviers du bassin de Campbon remaniés	OE/p-IVS	1,4
					Placage de limons éoliens sur les sables et graviers du bassin de Campbon	OE/p-IVG	5,1
					Limons éoliens	OE	128,2
					Limon sur sables et graviers plio-quaternaires	B/p-IVs	1,1
					Limon sableux à galets de quartz	B(sg)	0,7
					Limon riche en sable	B(s)	1,1
					Formation complexe des plateaux, argiles, limons éolien, graviers, cailloutis de quartz	B	179,1
Total	Total	351,7					
7	Sables plio-quaternaires	61 : Complexe de sols des dépôts sableux d'origine Plio-quaternaires. 75 : Complexe de sols sableux 76 Complexe de sols sableux	61	518,21	Pliocène, sables	p(s)	216
					Pliocène, sables graveleux, localement indurés	p(sg)	28,4
					Yprésien-Pliocène indéterminé, argiles, sables, cailloutis	e4-p	208
					Sables éoliens	N	2,7
					Plio-Quaternaire indifférencié, souvent soliflué ou remanié, cailloutis rubéfiés, sables, argiles	p-IV	71,2
					Pliocène, grave sableuse à graviers quartzeux roulés prédominants	pc	29,4
Pliocène, faciès sableux riches en silex noirs et concrétions siliceuses sénoniennes	px	5,4					
Total	Total	561,1					
8	Cailloux, graviers	64 : Sols développés sur les dépôts de pente quaternaires (cailloutis, graviers...)	64	93,33	Petits cailloux (Pliocène)	RB(q), p-IV, p-IV/g1b(c), p-IV/g1b(mc), p-IV/e6-g1a, p-IV/e7, p-IV/e5b(a)	95

Tableau A6-6 : Corrélation entre les descriptions issues des notices pédologique et géologique

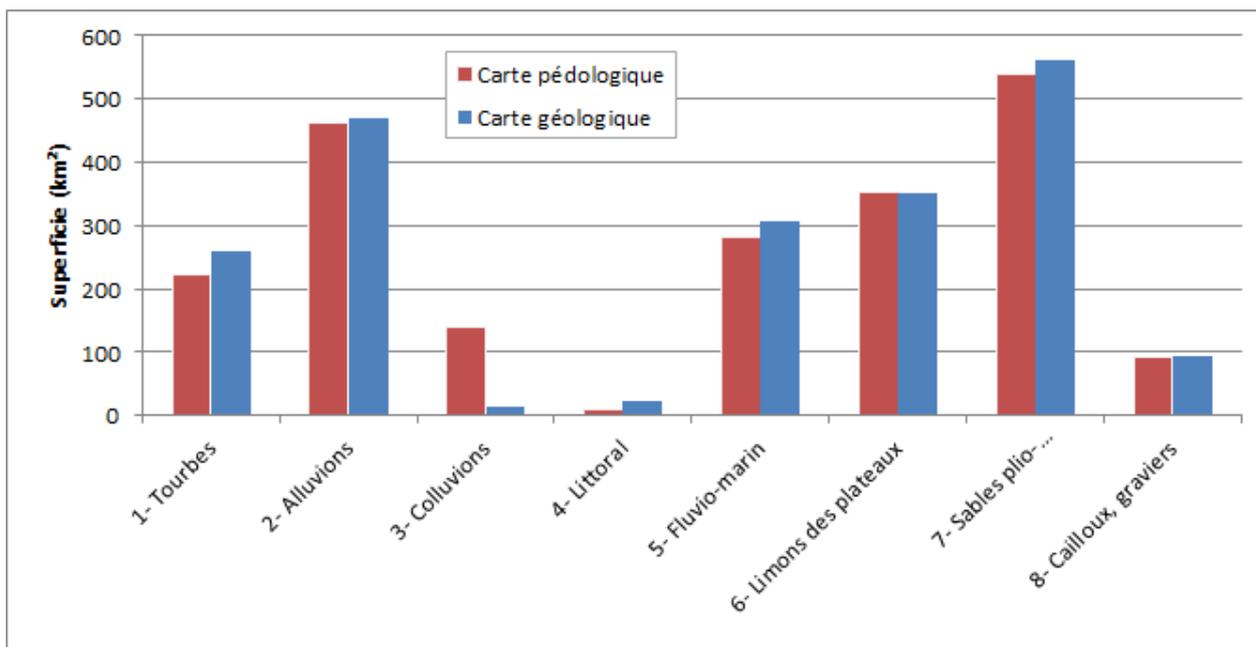


Figure A6-11 : Proportions des formations superficielles allochtones considérées dans les cartes géologique et pédologique

Dans les paragraphes ci-dessous, on présentera les 2 exemples les plus marquants de cette comparaison sur les formations superficielles allochtones : les limons des plateaux et les sables pliocènes. Les altérites ne sont pas représentées compte-tenu des différences notables de prise en compte entre les cartes pédologiques et géologiques. Dans les cartes géologiques anciennes, les altérites n'étaient en effet peu ou pas considérées.

Limons des plateaux

Les deux cartes sont en accord sur la superficie des dépôts de limons des plateaux pour l'ensemble du département. On dénombre des superficies de 353 km² pour la carte pédologique et de 352 km² pour la carte géologique. Malgré la cohérence de ces surfaces, aucune des cartes ne les cartographie réellement aux mêmes endroits (Figure A6-12).

Les zones de la carte pédologique non cohérentes avec la carte géologique sont renseignées sur la carte géologique comme des sables pliocènes, des dépôts plio-quadernaires indifférenciés, des revêtements d'interfluves (de 1 à 7 m de puissance), des argiles, sables et cailloutis yprésiens-pliocènes, graviers, sables argileux mio-pliocènes ou encore sont rattachés à des formations de socles (notamment des micaschistes). Les dépôts de la carte géologique non cohérents avec la carte pédologique sont souvent cartés dans les UCS de socle (UCS 36, 52, 71 ou plus faiblement 131). Enfin, la notice géologique précise bien que ces dépôts de limons sont d'origine quadernaire, reconnaissable par la présence de galets de quartz et parfois de sables.

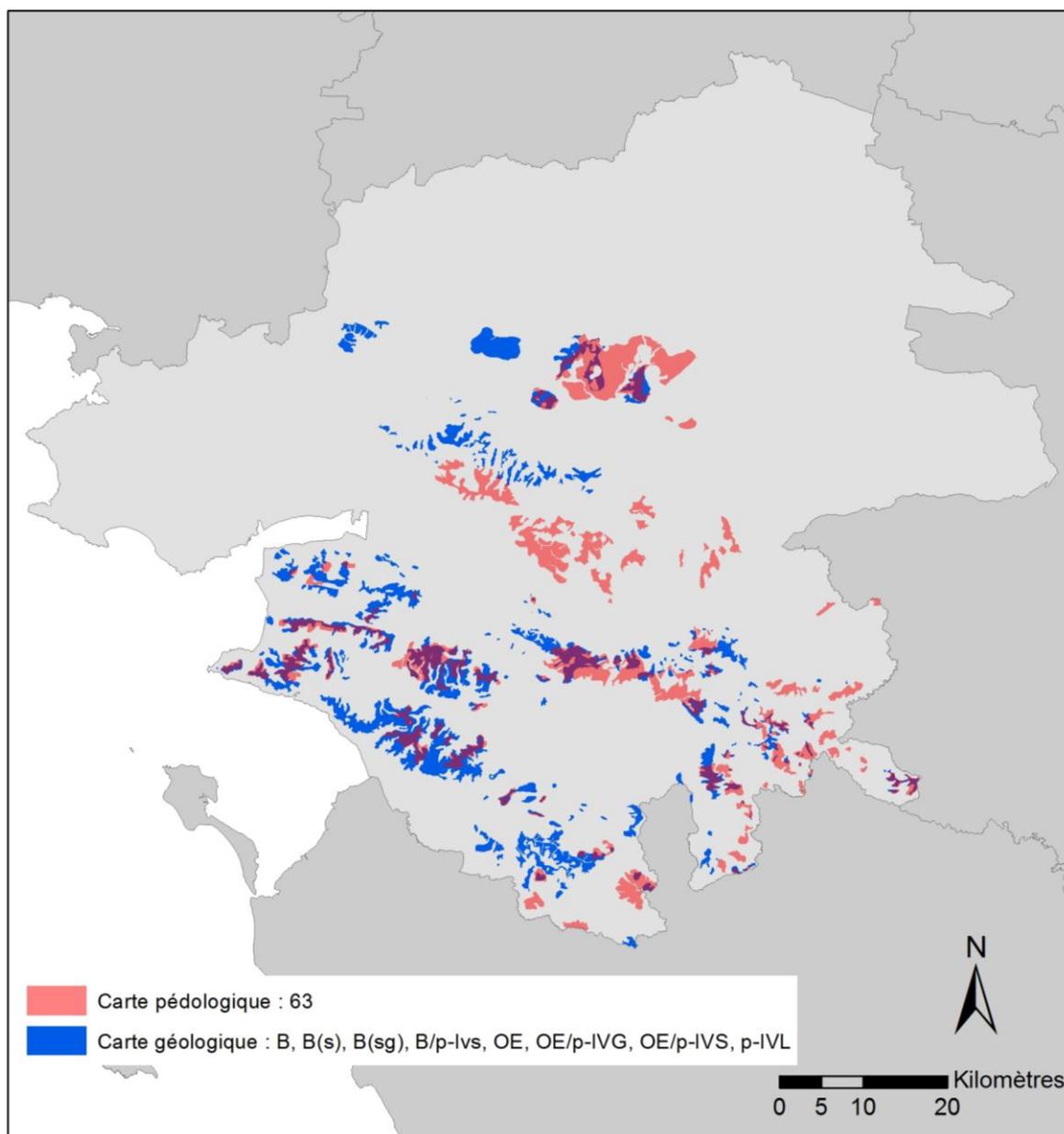


Figure A6-12 : Comparaison de la répartition des limons des plateaux cartographiés sur les cartes géologique et pédologique

Sables pliocènes

La Figure A6-13 montre une présence des sables plio-quadernaires sur l'ensemble du département. D'après le tableau, l'UCS 61 de la carte pédologique en dénombre environ 518 km². Les superficies des UCS 75 et 76 sont des dépôts locaux ; ils sont ainsi peu représentés sur la carte. Une proportion significative des sables apparaît localisée aux mêmes endroits sur les 2 cartes. Toutefois on note plusieurs secteurs divergents.

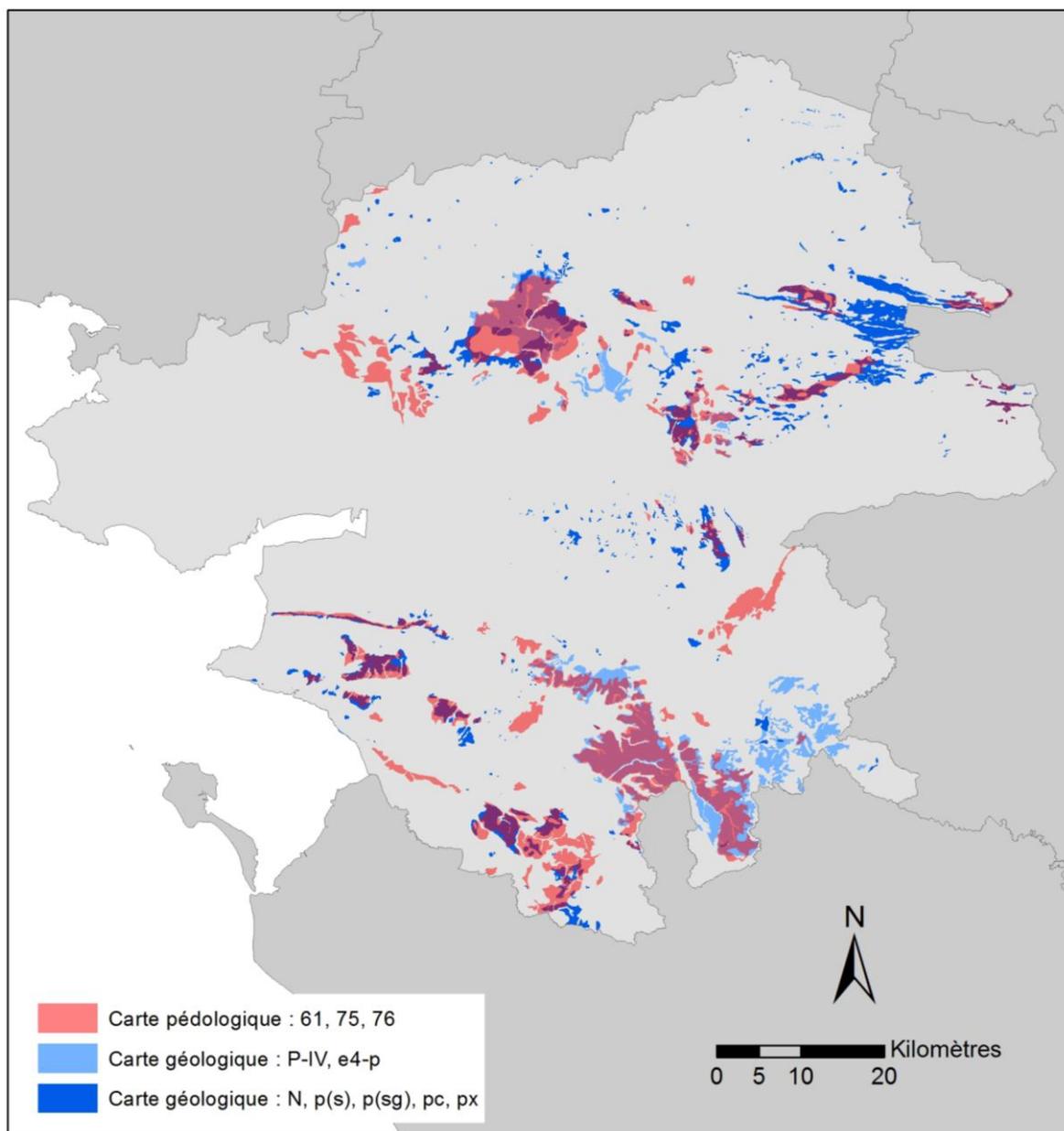


Figure A6-13 : Comparaison de la répartition des sables plio-quaternaires cartographiés sur les cartes géologique et pédologique

Références bibliographiques

Bechenec F. (2007) - Carte géologique harmonisée du département de Loire-Atlantique. BRGM/RP-55703-FR, 369 p.

Campy M. et Macaire J-J. (1989) Géologie des formations superficielles : géodynamique-faciès-utilisation, Masson éd., 433 pp.

Campy M. et Macaire J-J. (2003) Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux, 2^{ème} édition, Dunod, 440 pp.

Dubos J-C, V. Blondy, I. Rousseau, C. Ducommun, P. Leparoux, E. Mérot, J-P. Rossignol (2008) Département de Loire-Atlantique, Inventaire, Gestion, Conservation des Sols (IGCS), Rapport, 38 p.

Macaire J-J. (1971) Etude sédimentologique des formations superficielles sur le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung-sur-Loire (Loiret). Thèse de 3^{ème} cycle - Université d'Orléans, 2 tomes, 96 p, 43 fig.

C. Prognon, P. Nehlig, J. Roger, F. Lacquement, S. Courbouleix, O. Morel, F. Prognon et F. Quesnel (2009) Régolithe : substrat d'un développement durable – état de la connaissance sur les formations géologiques de surface. Rapport phase 1 BRGM/RPè57737-FR, 166 p.

Wyns R. (2007) Géologie de la surface (0-100m). Impact des paléo-altérations sur les propriétés des roches. Livret guide BRGM Formation, 96 p.

Notices de cartes géologiques (cf. références p. 64)

Annexe 7- Planche cartographique présentant les teneurs moyennes en éléments traces par objet géologique étudié, ainsi que les proportions d'anomalies forte et très forte.

- Planche 1 : pXRF (Niton) corrigé Phase 2 (METOTRASS – 2010-2013)
- Planche 2 : pXRF (Niton) corrigé Phase 1 (étude 2006) + Phase 2 (METOTRASS – 2010-2013)

Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol : METOTRASS

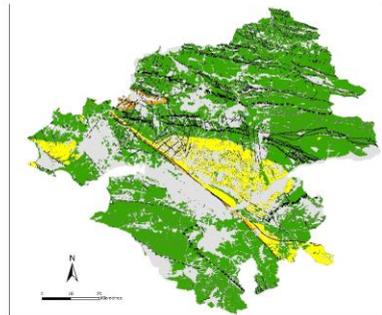


Teneurs moyennes en mg/kg :

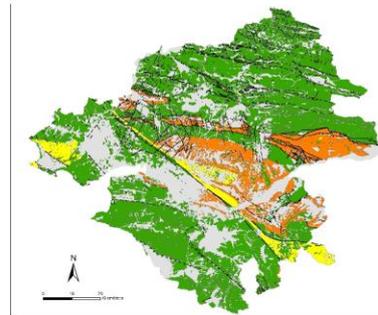
Arsenic	Plomb	Cuivre	Zinc
≤ 25	≤ 60	≤ 30*	≤ 100
25 - 50	60 - 100	30* - 60	100 - 250
50 - 100	100 - 500	60 - 100	250 - 1000
> 100	> 500	> 100	> 1000

Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :

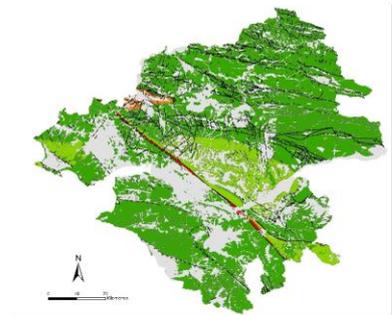
Vert foncé	Nulle (0%)
Vert clair	Très faible (≤ 5%)
Jaune	Faible (5% - 10%)
Orange	Moyenne (10% - 25%)
Rouge	Forte (>25%)



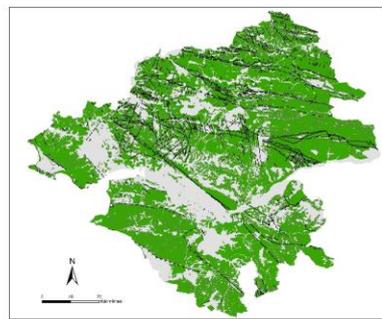
Arsenic



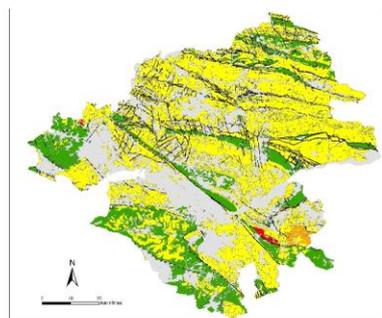
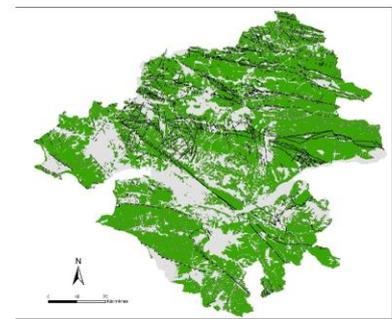
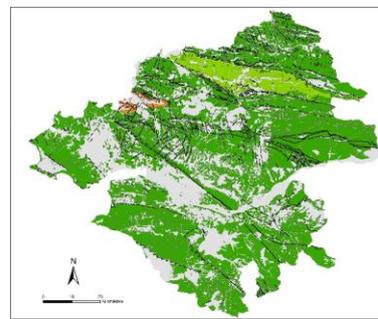
Anomalie forte



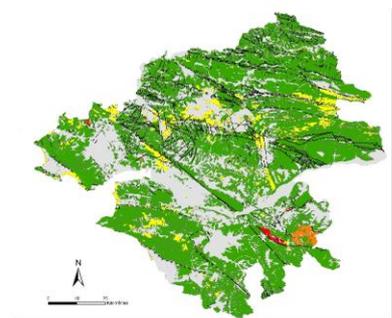
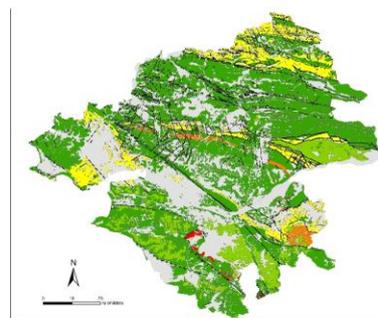
Anomalie très forte



Plomb



Cuivre



Zinc



Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol : NITON corrigé

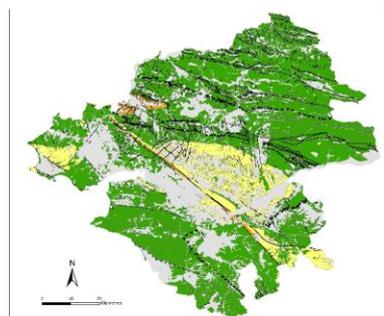


Teneurs moyennes en mg/kg :

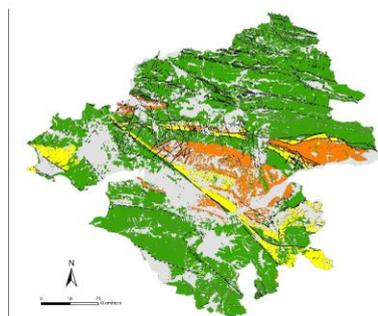
Arsenic	Plomb	Cuivre	Zinc
≤ 25	≤ 60	≤ 30*	≤ 100
25 - 50	60 - 100	30* - 60	100 - 250
50 - 100	100 - 500	60 - 100	250 - 1000
> 100	> 500	> 100	> 1000

Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :

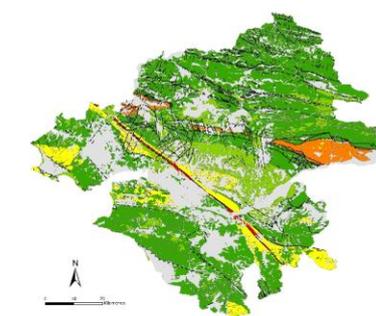
Vert foncé	Nulle (0%)
Vert clair	Très faible (≤ 5%)
Jaune	Faible (5% - 10%)
Orange	Moyenne (10% - 25%)
Rouge	Forte (>25%)



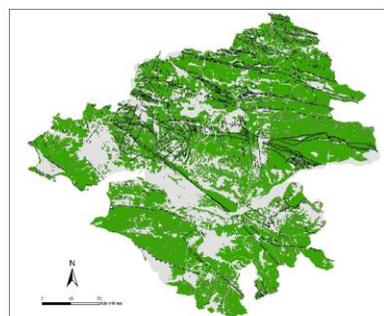
Arsenic



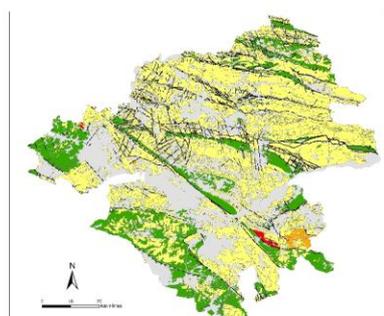
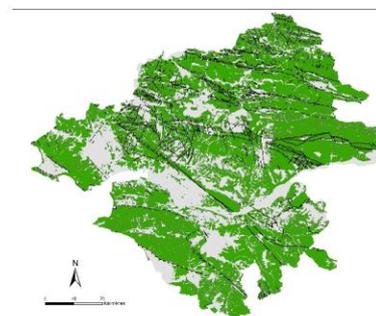
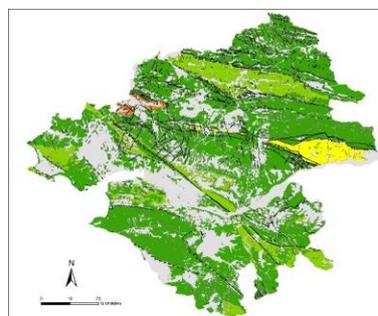
Anomalie forte



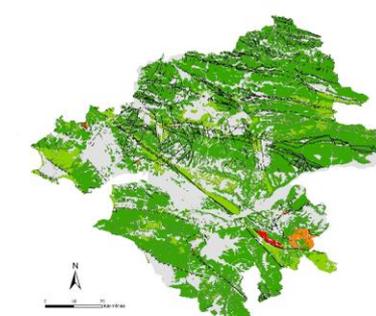
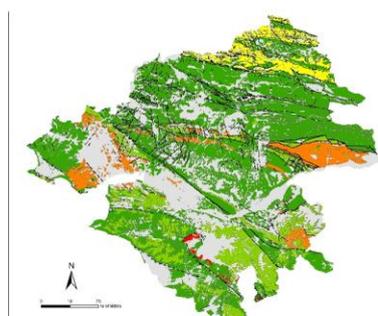
Anomalie très forte



Plomb



Cuivre



Zinc



Annexe 8 – Planche cartographique présentant une comparaison des proportions d'anomalies forte et très forte constatées dans les objets géologiques étudiés en fonction des jeux de données* utilisés

* l'origine anthropique de certaines anomalies n'a pu être vérifiée, pour les données SNEAP notamment.

Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol



Arsenic

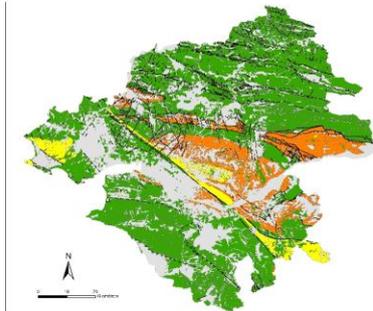
Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :



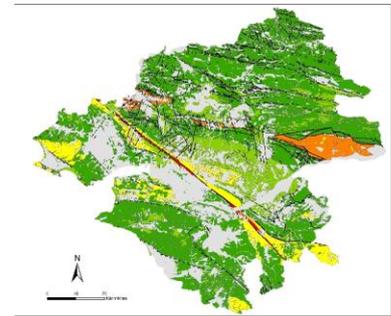
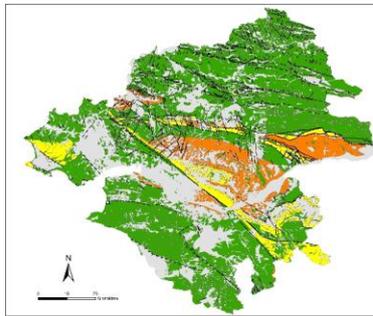
Anomalie forte

Anomalie très forte

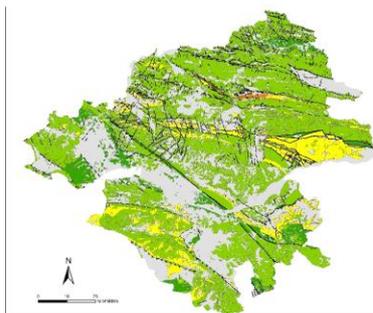
**METOTRASS :
NITON Phase 2 (2010-2013)**



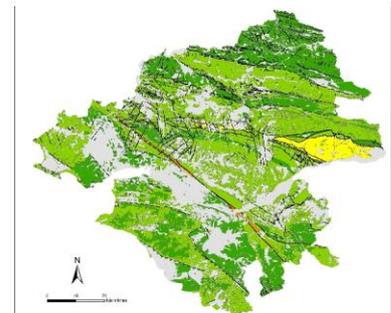
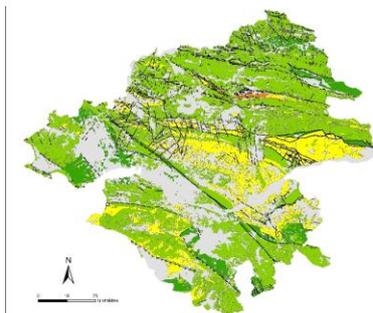
**Tout NITON :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)**



**Toutes données sauf NITON :
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



**Toutes données :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol



Plomb

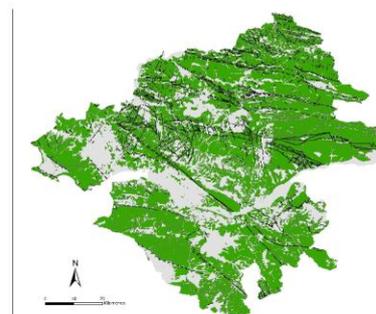
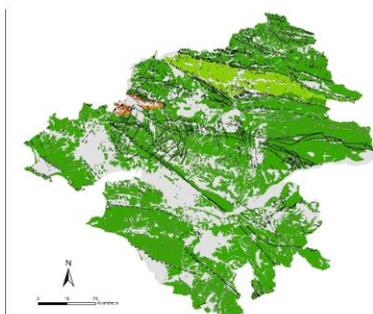
Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :



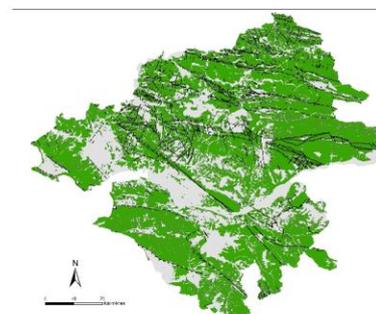
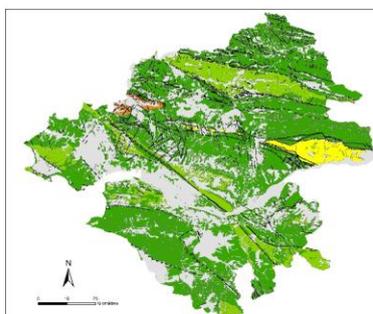
Anomalie forte

Anomalie très forte

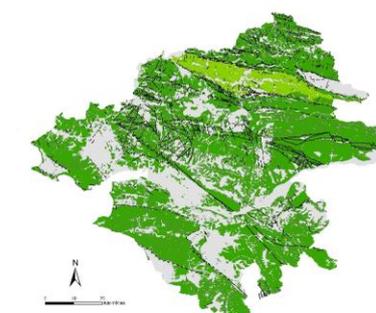
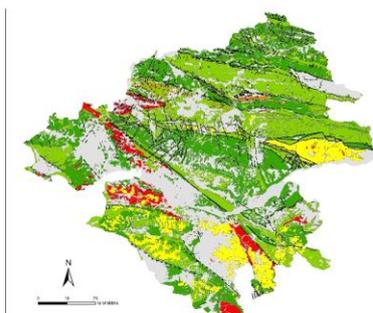
**METOTRASS :
NITON Phase 2 (2010-2013)**



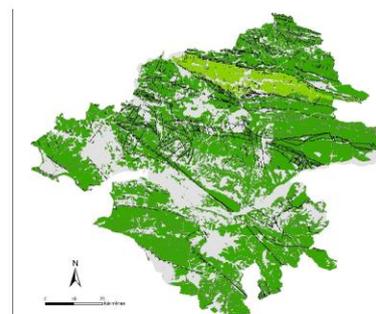
**Tout NITON :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)**



**Toutes données sauf NITON :
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



**Toutes données :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol



Zinc

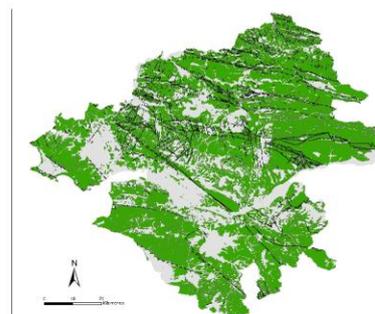
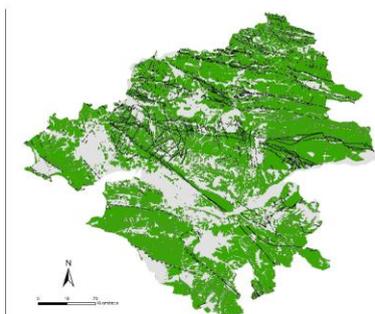
Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :



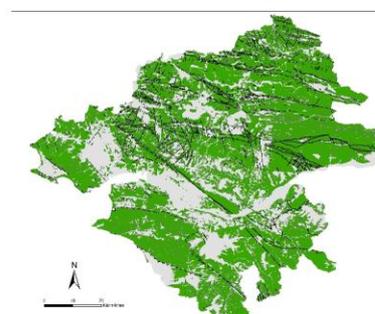
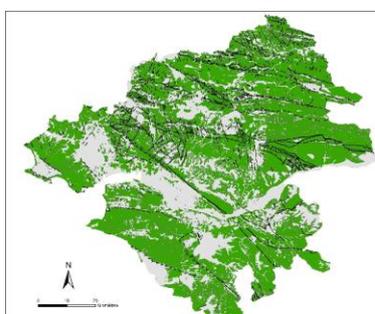
Anomalie forte

Anomalie très forte

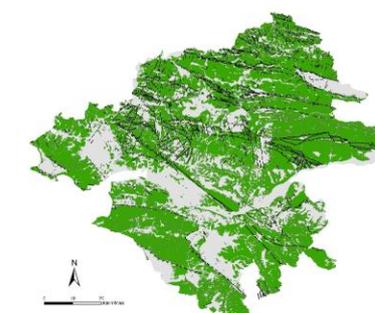
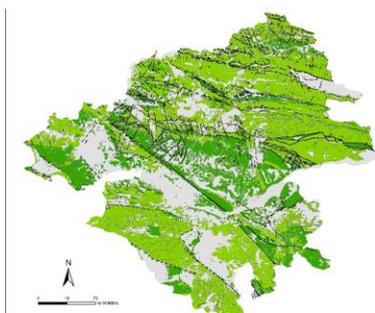
**METOTRASS :
NITON Phase 2 (2010-2013)**



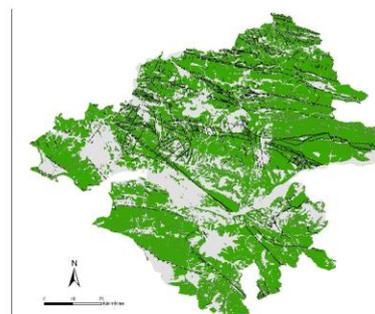
**Tout NITON :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)**



**Toutes données sauf NITON :
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



**Toutes données :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



Cartographie par objet géologique des données d'analyses de sol



Cuivre

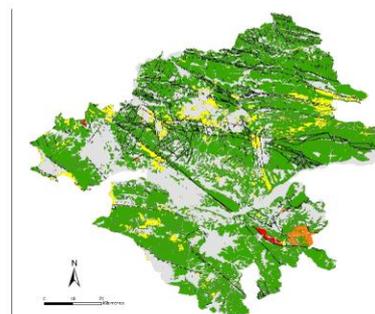
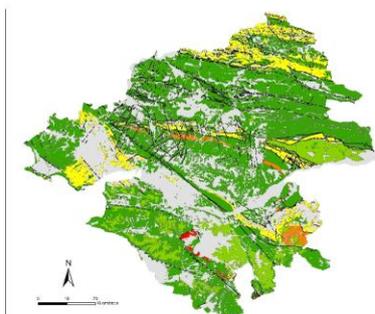
Proportion de teneurs supérieures au seuil d'anomalie :



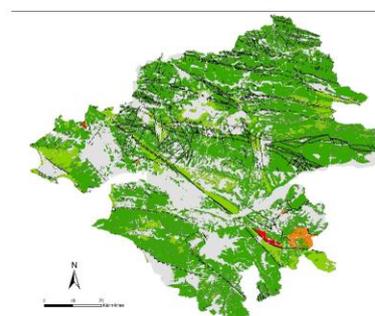
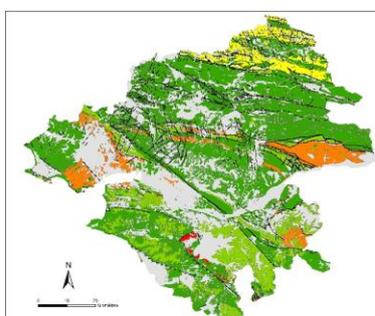
Anomalie forte

Anomalie très forte

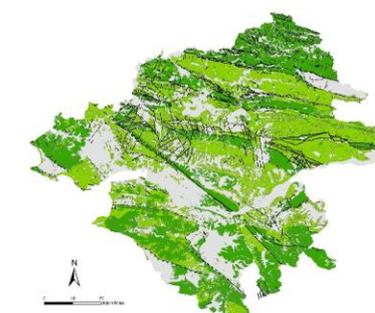
**METOTRASS :
NITON Phase 2 (2010-2013)**



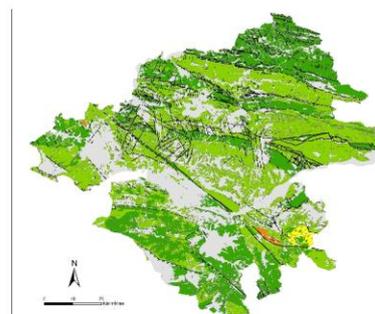
**Tout NITON :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)**



**Toutes données sauf NITON :
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**



**Toutes données :
NITON Phase 1 (2006)
NITON Phase 2 (2010-2013)
IMN
SNEAP
BDETM
Sté Loire 21**





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France
Tel. 02 38 64 34 34

Direction Régionale Pays-de-la-Loire
1 rue des Saumonières
BP 92342 – 44323 Nantes cedex 3 – France
Tél. : 02 51 86 01 51