

---

---

**Qualité du sol — Évaluation de  
l'exposition humaine par ingestion  
de sol et de matériaux du sol — Mode  
opératoire pour l'estimation de la  
bioaccessibilité/biodisponibilité pour  
l'homme de métaux dans le sol**

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)  
*Soil quality — Assessment of human exposure from ingestion of  
soil and soil material — Procedure for the estimation of the human  
bioaccessibility/bioavailability of metals in soil*

ISO 17924:2018

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8d46caae-2ac9-402d-941a-7a434a2b5ca/iso-17924-2018>



**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 17924:2018

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8d46caae-2ac9-402d-941a-7a434a2b5ca/iso-17924-2018>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2018

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
Fax: +41 22 749 09 47  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Le concept de bioaccessibilité/biodisponibilité pour les sites et sols pollués dans les évaluations de risques sanitaires</b> .....	<b>3</b>
<b>5</b> <b>Description des mécanismes d'absorption des substances par l'être humain</b> .....	<b>5</b>
<b>6</b> <b>Description des mécanismes de liaison des métaux (spéciation des métaux) dans le sol</b> .....	<b>8</b>
<b>7</b> <b>Utilisation et interprétation des tests <i>in vitro</i> pour l'évaluation du risque</b> .....	<b>9</b>
<b>8</b> <b>Description de la méthode d'essai</b> .....	<b>10</b>
8.1   Principe de l'essai.....	10
8.2   Appareillage.....	10
8.3   Réactifs.....	11
8.4   Préparation des liquides simulés.....	12
8.4.1   Généralités.....	12
8.4.2   Liquide salivaire simulé (1 000 ml).....	13
8.4.3   Liquide gastrique simulé (1 000 ml).....	13
8.4.4   Liquide duodénal simulé (1 000 ml).....	14
8.4.5   Liquide biliaire simulé (1 000 ml).....	15
8.4.6   Contrôle du pH des liquides mélangés.....	16
8.5   Prétraitement de l'échantillon.....	16
8.5.1   Généralités.....	16
8.5.2   Préparation des échantillons pour essai.....	16
8.5.3   Protocole d'analyse typique.....	16
8.6   Mode opératoire de préparation des échantillons.....	17
<b>9</b> <b>Traitement des données, contrôle de la qualité et présentation des résultats</b> .....	<b>19</b>
9.1   Généralités.....	19
9.2   Calcul de la bioaccessibilité.....	19
<b>Annexe A (informative) Mode opératoire de préparation des échantillons</b> .....	<b>21</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>22</b>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets)).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: [www.iso.org/iso/fr/avant-propos](http://www.iso.org/iso/fr/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 190, *Qualité du sol*, sous-comité SC 7, *Évaluation de l'impact*.

Cette première édition de l'ISO 17924 annule et remplace l'ISO/TS 17924:2007, qui a fait l'objet d'une révision technique. Les modifications par rapport à la précédente édition sont les suivantes:

- 7.1 «Généralités», 7.2 «Choix d'un essai approprié», 7.3 «Description des méthodes d'essai applicables» et 7.4 «Recommandations» ont été supprimés. 7.5 «Utilisation et interprétation des essais *in vitro* pour l'évaluation du risque» a été renuméroté en [Article 7](#) et essais *in vitro* a été remplacé par tests *in vitro*;
- [l'Article 8](#) «Description de la méthode d'essai» a été ajouté;
- [l'Article 9](#) (anciennement [Article 8](#)) «Traitement des données, contrôle de la qualité et présentation des résultats» a été totalement révisé;
- [l'Annexe A](#) «Essais de bioaccessibilité humaine» a été remplacée par [l'Annexe A](#) «Mode opératoire de préparation des échantillons»;
- les figures ont été révisées;
- le document complet a fait l'objet d'une révision éditoriale;
- le domaine d'application a été adapté.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Lors d'une évaluation de sols pollués par exemple par d'éléments potentiellement dangereux (e.g. l'arsenic), l'ingestion de sol (notamment par des enfants) est souvent considérée comme la voie d'exposition prépondérante. Cette évaluation est souvent fondée sur la concentration totale en d'éléments potentiellement dangereux dans le sol. Toutefois, plusieurs études suggèrent que la disponibilité d'éléments potentiellement dangereux (e.g. l'arsenic) dans le tractus gastrointestinal dépend de la forme d'éléments potentiellement dangereux présents et des paramètres physico-chimiques du sol spécifique du site. Des méthodes d'essai fondées sur des tests *in vivo* réalisés, par exemple, sur des porcs juvéniles ou des porcs nains, sont onéreuses, demandent beaucoup de temps et ne sont pas compatibles avec les processus décisionnels liés à l'évaluation et au traitement des sites pollués. Des méthodes d'essai ont donc été élaborées et validées. Elles mettent en œuvre des essais de laboratoire *in vitro* (tests *in vitro*) destinés à simuler des résultats *in vivo*. Ces méthodes d'essai permettront de réduire les coûts et les opérations liés à la mise en œuvre d'essais *in situ* sur un terrain contaminé.

Compte tenu des dépenses importantes auxquelles les propriétaires de terrains privés et les autorités publiques doivent faire face pour la réhabilitation d'un terrain contaminé, il existe une forte demande pour des Normes internationales relatives à l'évaluation des sols pollués, notamment pour ce qui concerne la santé humaine. Dans ce domaine complexe, les Normes internationales permettent de constituer une base scientifique commune pour l'échange de données, le développement des connaissances et l'évaluation robuste. Le but du présent document est de décrire les éléments de la mise en œuvre d'un de ces tests *in vitro* et de proposer des conseils concernant la combinaison et l'utilisation appropriées de ces éléments dans une situation donnée. La méthode est basée sur la Méthode de bioaccessibilité unifiée du Groupe de recherche sur la bioaccessibilité en Europe (BARGE UBM), qui a été élaborée et approuvée par le groupe BARGE.

Dans l'évaluation des risques pour la santé humaine, le terme «biodisponibilité» correspond spécifiquement à l'absorption d'une substance dans la circulation générale, conformément à l'utilisation toxicologique du terme. Cela tient compte de la «bioaccessibilité», paramètre correspondant à la part de substances du sol capable de se dissoudre dans les liquides digestifs humains. En outre, la biodisponibilité tient compte de l'absorption du contaminant à travers les membranes physiologiques et la métabolisation par le foie. La fraction biodisponible correspond à la part restant après dissolution dans les liquides digestifs, passage à travers les membranes épithéliales intestinales et métabolisation par le foie. Ces processus sont décrits dans [l'Article 4](#).

La biodisponibilité correspond à la fraction de la substance chimique absorbée dans la circulation générale, aussi deux paramètres peuvent être définis: la biodisponibilité absolue et la biodisponibilité relative. La biodisponibilité absolue est la part de la dose administrée qui est absorbée et qui atteint la circulation générale (et qui ne peut jamais être supérieure à 100 %). La biodisponibilité relative permet de comparer l'absorption d'une même substance dans deux matrices données via laquelle elle est administrée: par exemple dans un échantillon de sol par rapport à une administration dans des aliments ou dans une autre matrice utilisée lors d'étude de toxicité. Elle peut être supérieure ou inférieure à 1. Ce facteur peut être utilisé dans le cadre des évaluations de l'exposition pour une exposition par ingestion non intentionnelle de sol, particulièrement s'il existe potentiellement, pour un métal donné, une différence significative entre la biodisponibilité absolue sur le site étudié et celle établie lors d'une étude de toxicité dans des conditions particulières.

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 17924:2018

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8d46caae-2ac9-402d-941a-7a434a2bf5ca/iso-17924-2018>

# Qualité du sol — Évaluation de l'exposition humaine par ingestion de sol et de matériaux du sol — Mode opératoire pour l'estimation de la bioaccessibilité/biodisponibilité pour l'homme de métaux dans le sol

## 1 Domaine d'application

Le présent document traite de l'évaluation de l'exposition humaine par ingestion de sol et de matériaux du sol. Le présent document spécifie une procédure d'essai pertinente d'un point de vue physiologique pour l'estimation de la bioaccessibilité pour l'homme de métaux dans un sol contaminé, en liaison avec l'évaluation de l'exposition de l'homme par voie orale.

Cette méthode est un essai de lixiviation séquentiel utilisant des sucs gastrointestinaux synthétiques; elle peut être utilisée pour estimer la bioaccessibilité orale. Les sols ou autres matériaux géologiques, sous forme tamisée, sont extraits dans un environnement qui simule les conditions physico-chimiques de base du tractus gastrointestinal humain.

Le présent document décrit une méthode pour simuler la libération de métaux contenus dans un sol ou dans des matériaux de sol après le passage par les trois compartiments du tractus gastrointestinal humain (bouche, estomac et intestin grêle). La méthode d'essai produit des extraits qui sont représentatifs de la concentration d'éléments potentiellement dangereux dans le tractus gastrointestinal humain en vue d'une caractérisation chimique ultérieure. L'essai a été validé pour l'arsenic, le cadmium et le plomb dans le cadre d'un essai interlaboratoires international.

NOTE 1 La bioaccessibilité peut être utilisée pour estimer de manière approximative la biodisponibilité de la substance étudiée.

NOTE 2 La méthode a été validée pour l'arsenic, le cadmium et le plomb dans le cadre d'un essai interlaboratoires international. Elle a été validée *in vivo* pour évaluer la biodisponibilité de l'arsenic, du cadmium et du plomb.

## 2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 11074, *Qualité du sol — Vocabulaire*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'ISO 11074 ainsi que les suivants, s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>;
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>.

**3.1  
absorption**

processus par lequel un corps assimile une substance pour en faire une partie intégrante de lui-même

**3.2  
bioaccessibilité**

fraction d'une substance dans un sol ou un matériau du sol, libérée dans les sucs gastrointestinaux (humains) et donc disponible pour absorption

**3.3  
biodisponibilité**

fraction d'une substance présente dans un sol ingéré, qui atteint la circulation générale (circulation sanguine)

**3.4  
contaminant**

substance ou agent présent(e) dans le sol du fait de l'activité humaine

Note 1 à l'article: La présente définition ne présuppose pas l'existence d'un danger dû à la présence du contaminant.

**3.5  
contact cutané**

contact avec la peau

**3.6  
exposition**

dose d'une substance chimique qui atteint le corps humain

**3.7  
voie d'exposition**

chemin suivi par une substance entre une source et un récepteur

**3.8  
ingestion**

acte consistant à introduire des substances, comme du sol et des matériaux du sol, dans le corps par la bouche

**3.9  
test de bioaccessibilité *in vitro***

détermination de la bioaccessibilité réalisée hors d'un organisme vivant

**3.10  
dose sans effet indésirable observé  
DSEIO**

dose à laquelle aucun effet indésirable ne peut être observé sur un récepteur

**3.11  
pica**

comportement alimentaire caractérisé par la consommation de substances généralement atypiques et non comestibles, comme des matériaux du sol et des cailloux

Note 1 à l'article: Le terme «pica» est dérivé du nom latin *pica pica* désignant la Pie bavarde qui prélève au hasard tous genres de matériaux pour la construction de son nid.

**3.12  
dose hebdomadaire tolérable provisoire  
DHTP**

quantité hebdomadaire tolérable provisoire d'une substance qui peut être absorbée par le corps humain au cours de sa vie, via la chaîne alimentaire, sans affecter la santé humaine

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 17924:2018

https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5caae-2ac9-402d-941a-7a434a2b5ca/iso-17924-2018



**3.13****récepteur**

<humain> personne potentiellement exposée

**3.14****fraction d'absorption relative****FAR**

rapport entre la quantité d'un contaminant atteignant la circulation générale lorsqu'il est ingéré avec, par exemple, du sol, et la même quantité obtenue lorsqu'il est ingéré lors de la détermination de la toxicité pour établir les critères

**3.15****espèces**

différentes formes d'une substance toujours produites ensemble à l'équilibre réactionnel

**3.16****dose journalière tolérable****DJT**

quantité journalière tolérable d'une substance qui peut être absorbée par le corps humain au cours de sa vie, via la chaîne alimentaire, sans affecter la santé humaine

## **4 Le concept de bioaccessibilité/biodisponibilité pour les sites et sols pollués dans les évaluations de risques sanitaires**

La caractérisation de la bioaccessibilité/biodisponibilité est habituellement réalisée en tant que partie intégrante d'une évaluation de risque et/ou de l'exposition.

Une évaluation du risque comprend les éléments suivants:

- identification des dangers; [ISO 17924:2018](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8d46caae-2ac9-402d-941a-ff694a2b5ca/iso-17924-2018)
- évaluation de la relation dose-effet; <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8d46caae-2ac9-402d-941a-ff694a2b5ca/iso-17924-2018>
- évaluation de l'exposition;
- et, sur la base des éléments ci-dessus: caractérisation du risque.

Une évaluation de l'exposition est le processus au cours duquel l'intensité, la fréquence et la durée de l'exposition humaine à une substance sont estimées. Ce processus comprend:

- l'identification et la caractérisation de la source;
- l'identification des voies d'exposition;
- l'identification des récepteurs/groupes cibles concernés;
- et, sur la base des éléments ci-dessus: l'évaluation de l'exposition.

S'agissant de l'évaluation des effets sur la santé humaine, l'analyse des voies d'exposition constitue un prérequis. Lorsque des personnes (récepteurs) ne sont pas directement exposées à un contaminant, il importe que l'évaluation du degré d'exposition tienne compte des divers moyens par lesquels une exposition indirecte peut se produire, ainsi que de leur importance.

L'exposition humaine à la contamination du sol peut se faire par le biais de différents milieux.

Directement à partir du sol, par les voies d'exposition suivantes:

- l'ingestion de sol, par voie alimentaire et par adhérence aux mains et aux légumes non lavés, etc.;
- le contact cutané;
- l'ingestion de poussière à l'intérieur du domicile essentiellement composée de matériau de sol.

L'exposition par l'air comprend:

- l'inhalation et l'ingestion de poussières diffuses;
- l'inhalation de substances gazeuses provenant de sources extérieures;
- l'inhalation de vapeurs introduites dans les bâtiments.

L'exposition par le biais de la chaîne alimentaire comprend:

- la consommation de végétaux, comprenant des produits agricoles végétaux, des plantes potagères, des végétaux sauvages et des champignons;
- la consommation d'animaux et de produits d'origine animale, y compris des animaux sauvages;
- la consommation d'eau contaminée.

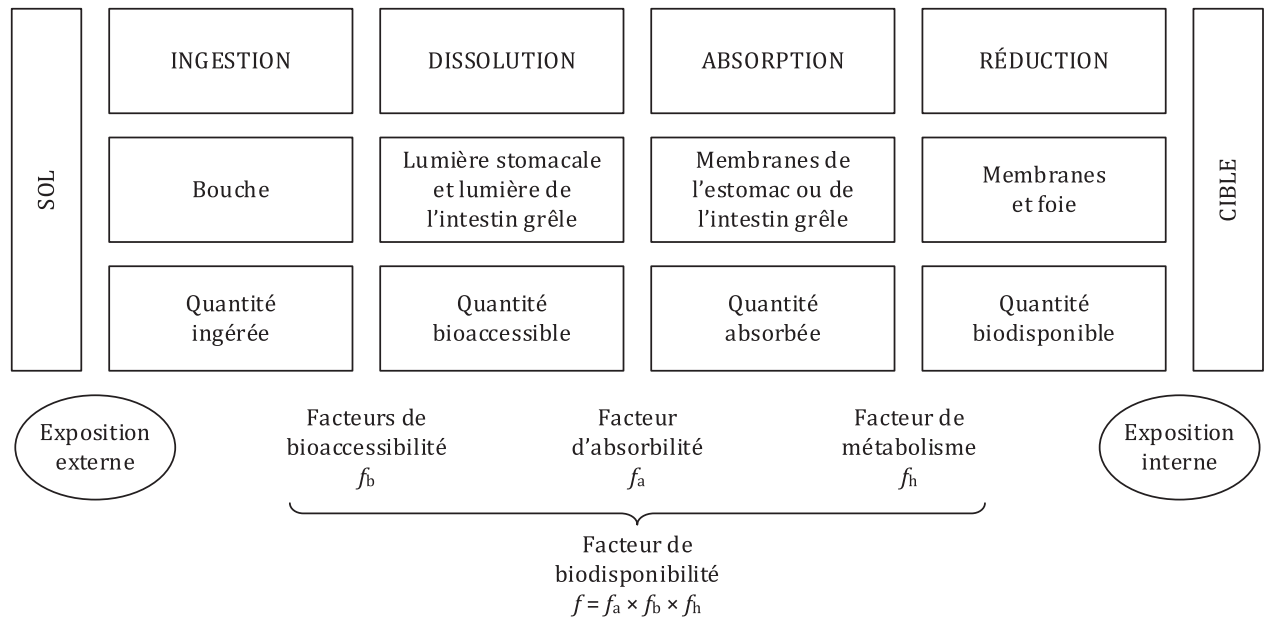
Le champ d'application du présent document couvre l'absorption directe de sol par ingestion et/ou l'ingestion de poussières diffuses. L'ingestion orale constitue l'une des plus importantes voies d'exposition des êtres humains aux contaminants du sol.

Les critères de qualité du sol (limites de concentration maximale pour le sol) sont habituellement calculés sur la base d'une dose journalière tolérable (DJT) ou d'une dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP), qui peut être déduite à partir de la dose sans effet nocif observé (DSENO ou NOAEL en anglais) déterminée à partir de données épidémiologiques ou de données expérimentales. En ce qui concerne les cancérigènes génotoxiques pour lesquels aucun seuil d'effet n'est fixé, la DJT est fixée à un niveau qui correspond à un niveau faible tolérable (négligeable) de risque de cancer.

La détermination de la DJT se fonde essentiellement sur les données relatives à la toxicité orale. Ces données sont souvent élaborées à partir d'études expérimentales lors desquelles la substance est administrée aux animaux via l'alimentation ou l'eau de boisson. La quantité de substance induisant des effets sur la santé chez l'animal est ensuite déterminée. Des études épidémiologiques peuvent également être utilisées pour déterminer les effets d'une exposition sur la santé humaine. La plupart des études épidémiologiques sont basées sur la quantité totale ingérée et seules quelques-unes fournissent des valeurs exactes sur la biodisponibilité des substances administrées.

Lors de l'extrapolation de ces conditions expérimentales à d'autres conditions (l'ingestion de sol contaminé par exemple), il est supposé que l'absorption d'une substance donnée est la même pour tous les scénarios, c'est-à-dire que la biodisponibilité absolue du contaminant est constante. La biodisponibilité orale absolue d'une substance peut être définie comme la fraction de substance ingérée qui atteint la circulation générale, c'est-à-dire qui pénètre dans la circulation sanguine. La biodisponibilité orale absolue d'une substance peut être comprise entre 0 et 1 (c'est-à-dire 100 %), selon la forme physico-chimique de la substance. Dans ce contexte, l'utilisation du concept de biodisponibilité orale absolue repose sur l'hypothèse selon laquelle les effets de la substance sur la santé sont systémiques et donc déclenchés lorsque la substance atteint la circulation sanguine. Ainsi le concept d'exposition interne est mis en perspective avec celui d'exposition externe mesurée directement en tant que quantité de milieu ingéré multipliée par la concentration de la substance dans ce milieu (voir [Figure 1](#)).

La biodisponibilité absolue peut être déterminée par le ratio entre la quantité de substance dans le sang (animal ou humain) après injection en intraveineuse (biodisponibilité de 100 %) et celle après ingestion orale (absorption de fraction biodisponible).



**Figure 1 — Représentation schématique des processus d'absorption orale**

Une approche plus pratique consiste à mesurer la biodisponibilité relative ou fraction d'absorption relative (FAR) qui représente le rapport entre la quantité d'une substance atteignant la circulation générale lorsqu'il est ingéré, par exemple dans du sol, et la même quantité ingérée lors de la détermination de la toxicité dont les paramètres sont fixés.

Il convient de noter que, bien que la plupart des biodisponibilités relatives soient inférieures à 1 et qu'elles devraient aboutir à des niveaux acceptables plus élevés, des valeurs de FAR supérieures à 1 sont possibles et induisent donc des risques plus importants.

## 5 Description des mécanismes d'absorption des substances par l'être humain

Plusieurs compartiments sont impliqués dans la biodisponibilité pour l'homme des contaminants du sol ingérés, comme décrit à l'[Article 4](#).

Les aliments et le sol contaminé sont d'abord soumis à un broyage mécanique au niveau de la bouche, puis, par une série de processus chimiques et microbiologiques, ils subissent une dissolution partielle à travers le tractus gastrointestinal (processus de bioaccessibilité). Les composants dissous passent à travers les membranes de l'épithélium gastrointestinal (absorption) pour parvenir à la circulation sanguine. Durant le passage à travers les membranes, une dégradation peut se produire (métabolisation). Après absorption, le sang passe par le foie avant d'entrer dans la circulation générale. Cette étape hépatique conduit à la dégradation ou l'élimination de composés indésirables dans le foie (métabolisme, effet de premier passage). La plupart des processus de dissolution s'achèvent avant que le matériau ne quitte l'intestin grêle, et il est généralement reconnu que la majeure partie de l'assimilation se déroule dans l'intestin grêle. Une éventuelle assimilation de la substance au niveau stomacal dépend de la nature du composé. L'environnement chimique de chaque compartiment digestif est différent et influence le processus de bioaccessibilité (voir [Tableau 1](#)).

**Tableau 1 — Fonctions et conditions dans les compartiments impliqués dans les processus de bioaccessibilité**

Compartiment	Fonctions essentielles de la digestion	Principaux «réactifs» intervenant dans la digestion	pH	Durée de séjour	Fonction de dissolution des contaminants
Bouche	Broyage Dégradation de l'amidon	Humidité Amylase	6,5	Secondes à minutes	Le broyage favorise la dissolution ultérieure.
Œsophage	Transport	Aucun	6,5	Secondes	Aucun
Estomac	Dégradation des protéines et des graisses	Acide chlorhydrique Protéases Lipases	1 à 5	8 min à 3 h	L'acide dissout les oxydes minéraux labiles, des sulfures et des carbonates pour libérer des métaux.
Intestin grêle	Dégradation des oligosaccharides, protéines, graisses et autres constituants Solubilisation des graisses	Bicarbonate Bile Protéases Lipases Oligosaccharases Phosphatases	4 à 7,5	2 h à 10 h	La matière organique est dissoute et les contaminants liés sont libérés. Les métaux cationiques sont solubilisés par complexation avec les acides biliaires. Certains métaux sont précipités par le pH élevé ou par le phosphate.

Le pH dans l'estomac peut varier entre 1 (à jeun) et 5 (après alimentation). De la même manière, le temps de demi-vidange stomacale varie de 8 min à 15 min et de 30 min à 3 h, respectivement, dans des conditions de jeûne et d'alimentation moyenne. Par ailleurs, la libération de bile varie également, des quantités importantes étant libérées dans des conditions d'alimentation. Enfin, le pH dans l'estomac peut être plus faible chez les jeunes enfants que chez les adultes.

Le tractus gastrointestinal constitue un écosystème complexe avec des microorganismes aérobies et anaérobies. Chez l'homme, la densité des microorganismes est moindre dans l'estomac et dans la partie supérieure de l'intestin grêle, mais elle va en augmentant jusqu'au gros intestin. Les microorganismes anaérobies dominent dans les fèces humaines, tandis que les bactéries aérobies se trouvent en grande densité plus haut dans le gros intestin. La présence de bactéries sulfato-réductrices a été détectée dans le gros intestin de l'être humain, tandis que des concentrations élevées en oxygène ont été mesurées tout le long du tractus gastrointestinal chez le porc. En général, des conditions et des microorganismes aérobies sont attendus au niveau stomacal alors que des conditions anaérobies sont de plus en plus retrouvées de l'intestin grêle jusqu'au gros intestin.

L'absorption exige que les contaminants soient dissous (libres ou liés à un transporteur dissous tel que la bile), transportés vers la paroi gastrointestinale ou, s'ils sont liés à un transporteur, libérés à la surface de la paroi gastrointestinale pour y être absorbés. Les mécanismes de liaison métaux/transporteur peuvent être la complexation de métaux cationiques par des acides biliaires. Des acides biliaires, des protéines et autres agents complexants peuvent accentuer l'exposition aux métaux cationiques. De plus, des lipides et autres matières organiques solubles présentes dans le bol alimentaire peuvent s'ajouter à l'effet transporteur de la bile.

Les processus simples de dissolution/transport/absorption peuvent se compliquer par la prise en compte de la cinétique chimique résultant du changement séquentiel dans l'environnement chimique du tractus gastrointestinal, des paramètres physico-chimiques du sol ingéré et de la substance. Par exemple, le plomb sous la forme d'anglésite (majoritairement  $PbSO_4$ ), est un contaminant courant, qui se dissout dans l'estomac et y restera en solution du fait du pH faible et de la concentration élevée en acide chlorhydrique (voir [Figure 2](#)). En pénétrant dans l'intestin grêle où le pH est plus élevé, en présence de phosphate dissous, les ions plomb ( $Pb^{2+}$ ) précipitent très rapidement sous forme de chlorophosphate de plomb [chloropyromorphite,  $Pb_5(PO_4)_3Cl$ ]. Le phosphate peut avoir pour origine les aliments digérés