

"nos cimetières

contaminent

les eaux  
souterraines

empoisonne

nt le sol

les

médicaments

et

Métaux lourds

un seul poison, nous

sommes un poison

Ivo Willimann

# **Décomposition des cadavres dans la tombe en terre**

Perturbation de la  
décomposition

-

Hygiène

-

# Mesures

Institut d'écologie terrestre (ITÖ), EPF Zurich

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Processus de décomposition chez l'homme.....</b>	<b>3</b>
Résumé.....	3
1.1. Composition de l'être humain.....	4
1.2. Autolyse.....	6
1.3. Putréfaction et décomposition.....	7
1.4. Temps nécessaire.....	9
1.4.1. Insectes.....	10
1.4.2. Température.....	10
1.4.3. Produits chimiques et médicaments.....	11
1.4.4. Momification.....	12
Questions ouvertes.....	12
<b>2. Conservation des acides gras.....</b>	<b>14</b>
Résumé.....	14
2.1. Mécanisme.....	15
2.2. Durcissement de la graisse.....	16
2.3. Composition chimique et morphologie des adipocires.....	19
2.4. Résistance à la dégradation de l'adipocire.....	20
2.4.1. Inhibition du processus de putréfaction.....	20
2.4.2. Persistance de l'adipocire.....	23
2.4.3. Réduction de l'adipocire.....	24
2.5. Facteurs influençant la formation d'adipocytes.....	25
2.5.1. Oxygène.....	26
2.5.2. Température du corps.....	26
2.5.3. Transport de chaleur.....	27
2.5.3.1. Conduction de la chaleur (conduction).....	27
2.5.3.2. Diffusion de vapeur d'eau (flux de chaleur latente).....	29
2.5.4. Diversité bactérienne.....	30
2.5.5. Richesse et répartition des graisses.....	31
2.5.6. Matière végétale.....	32
Questions ouvertes.....	32
<b>3. Interactions entre le sol et la décomposition des cadavres.....</b>	<b>35</b>
Résumé.....	35
3.1. Température du sol.....	36
3.2. Régime hydrique du sol.....	36
3.2.1. L'espace poreux.....	37
3.2.2. Texture.....	39
3.2.3. Formation de la structure.....	40
3.3. Conditions de décomposition dans différents sols.....	41

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	
3.4. Impact de l'activité funéraire sur le sol	44
3.4.1. Compactage mécanique des sols	44
3.4.2. Couche abrasive mécanique	44
3.4.3. Podsolisation	45
3.4.3.1. Introduction générale	45
3.4.3.2. Podsolisation à la profondeur d'inhumation	46
3.4.4. Occlusion organique des pores	47
3.4.4.1. Par les substances humiques	47
3.4.4.2. Par des bactéries	48
3.4.5. Déplacement de l'argile	49
3.5. Déterminations sur le terrain dans le cimetière de Zurich-Affoltern	50
Questions ouvertes	51
<b>4. Aspects hygiéniques dans les cimetières</b>	<b>53</b>
Résumé	53
4.1. Rétrospective historique	54
4.2. Bactéries et virus	55
4.2.1. Présence de germes pathogènes dans les cadavres	56
4.2.2. Capacité de survie des agents pathogènes dans le sol	56
4.2.3. Transport d'agents pathogènes vers les eaux souterraines	58
4.3. Atteinte par les produits de dégradation organiques	59
4.3.1. Toxicité des catabolites cadavériques	60
4.3.2. Transport des catabolites cadavériques	60
4.3.3. Comparaisons quantitatives	60
4.4. Apport de mercure	61
Questions ouvertes	62
<b>5. Mesures</b>	<b>64</b>
Résumé	64
5.1. Choix du terrain	65
5.2. Profondeur d'inhumation	66
5.3. Plantation de cimetière	68
5.4. Cercueil	69
5.4.1. Digression sur le cimetière musulman de Zurich	69
5.5. Vêtements mortuaires	70
5.6. Décomposition accélérée grâce à la matière végétale de remplissage	70
5.7. Rénovations de cimetières	71
5.7.1. Pour la conduite de drainage	71
<b>Grâce à</b>	<b>74</b>
<b>Glossaire</b>	<b>75</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>
<b>Annexe</b>	<b>81</b>
Annexe A : Données et observations relatives à l'expérience de Rodriguez/Bass	82
Annexe B : Effet acide des acides gras à longue chaîne	84
Annexe C : Compilation des catabolites cadavériques	85
Annexe D : Données relatives aux sondages pédologiques et géologiques au cimetière de Zurich-Affoltern	87



# INTRODUCTI ON

"L'homme est une calamité pour ce monde", dit-il en conspirant et en fermant la porte du four. Même morts, nous polluons l'air et la terre". Nos cimetières polluent la nappe phréatique, empoisonnent le sol. Médicaments et métaux lourds, un vrai gâchis ! Nous sommes un poison. Du poison ! Justement en tant que cadavres".

*Hansjörg Schertenleib : La chambre de la Signora*

Au siècle dernier encore, les scientifiques se livraient à des débats passionnés sur les complications hygiéniques qui pourraient résulter des cimetières. Ces débats étaient influencés par la "théorie des miasmes" - l'idée que les maladies peuvent être transmises par de mauvaises odeurs. Les partisans de la crémation savaient parfaitement intégrer ces "miasmes" dans leur argumentaire. Au tournant du siècle, les bactéries ayant entre-temps été reconnues comme des organismes responsables de maladies, les discussions sur l'inhumation ont tout d'abord perdu leur caractère polémique, puis ont complètement diminué. Depuis les années 20 de ce siècle, les cimetières sont désormais largement absents du champ de vision des scientifiques. Seule la médecine légale a mené des recherches sur la détermination de la cause et de l'heure de la mort, qui sont également intéressantes pour la compréhension des processus dans un corps enterré.

Compte tenu du peu d'intérêt des sciences naturelles pour les cimetières, il n'est pas surprenant que le travail de diplôme à l'origine de ce rapport n'ait pas été réalisé de sa propre initiative. Il est plutôt le fruit d'une initiative du service des pompes funèbres de la ville de Zurich. L'observation du fait que des corps peuvent être encore largement non décomposés après l'expiration de la période de repos funéraire a suscité le besoin d'une clarification plus approfondie de ce phénomène. Différentes questions se posaient aux fonctionnaires des pompes funèbres : quels sont les processus qui conduisent à l'arrêt de la décomposition des corps ? Quels sont les facteurs qui favorisent la conservation d'un cadavre ? Et comment peut-on empêcher l'apparition de cadavres conservés ?

L'étude du contexte des troubles de la décomposition dans les cimetières était au centre du présent travail de diplôme. Au moyen d'une recherche bibliographique, il s'agissait d'obtenir une image aussi précise que possible des processus qui peuvent se dérouler dans un cadavre. Les résultats de ces recherches sont rassemblés dans les chapitres 1 et 2. Le chapitre 1 traite du processus de décomposition non perturbé d'un cadavre jusqu'à sa squelettisation complète. Le chapitre 2 traite de la conservation des acides gras. Il s'agit d'un trouble de la décomposition qui apparaît fréquemment dans certains cimetières de Zurich, mais aussi dans de nombreux lieux d'inhumation d'autres localités. Outre l'idée mécaniste de la manière dont la conservation des acides gras pourrait se produire, différents facteurs d'influence sont discutés.

Le chapitre 3 examine l'influence des différentes conditions du sol sur le processus de dégradation d'un cadavre. Les facteurs qui ont été identifiés dans le chapitre précédent comme favorisant la conservation des acides gras servent de base à cet effet. D'autre part, le chapitre 3 s'interroge également sur les effets que la décomposition des cadavres peut avoir sur le sol. Dans ce contexte, des investigations de terrain ont été menées dans le cimetière de Zurich-Affoltern.

Certains aspects hygiéniques sont soulevés dans le chapitre 4. L'employé de la crémation, que Hansjörg Schertenleib fait parler dans la citation d'introduction, prend position de manière exagérée sur la situation hygiénique dans les cimetières. Les préoccupations exprimées sont toutefois infondées. Elles expriment plutôt un malaise, comme beaucoup de gens le ressentent encore aujourd'hui à l'égard des cimetières. Contrairement à l'orientation de la citation citée, le quatrième chapitre évalue d'abord les possibilités de propagation des germes pathogènes. L'éventuelle atteinte chimique du sol des cimetières n'est que brièvement abordée.

Le chapitre 5 traite des mesures à prendre dans la pratique funéraire. Ce chapitre contient des propositions visant à prévenir, à éviter ou à atténuer les troubles de la décomposition.

# 1. PROCESSUS DE DÉCOMPOSITION SUR PERSONNES

## Résumé

Dans la tombe en terre, la décomposition du corps se fait en grande partie à l'abri de la faune. En particulier, la couche de terre qui recouvre le cercueil tient les asticots à l'écart, ce qui ralentit la décomposition. La durée moyenne de squelettisation d'un corps enterré est d'environ cinq à sept ans.

Peu après la mort, les enzymes de l'organisme commencent déjà à se décomposer. Suite à ce processus autolytique, les membranes cellulaires deviennent plus perméables, ce qui entraîne un mélange des substances cellulaires avec les substances intercellulaires. Morphologiquement, les tissus mous se liquéfient. Les modifications des parois des organes creux (en particulier les parois intestinales), qui deviennent plus souples et plus minces, sont également d'une importance capitale pour la suite du processus de décomposition. Cela permet à la flore intestinale de se répandre dans le corps et de soutenir la décomposition du cadavre. Avec l'intervention des bactéries dans le processus de décomposition, on parle désormais de processus de putréfaction.

Pendant la phase de putréfaction intensive, l'activité biochimique est si fortement augmentée qu'il se produit une hausse de température dans le cadavre. Cette augmentation de la température a à son tour pour effet d'accroître l'activité des enzymes et des micro-organismes. L'évaporation des tissus mous est accélérée et une partie du liquide libéré s'accumule dans les organes creux. En raison de la formation de gaz par le métabolisme bactérien, une pression interne s'établit dans le corps, comprimant les organes creux et expulsant vers l'extérieur, par les orifices, le liquide qui s'y est accumulé. De cette manière, le corps se déshydrate. Avec la perte croissante de liquide dans le corps, les processus de décomposition aérobies augmentent et conduisent à la squelettisation complète.



Lorsque les plantes et les animaux meurent, leur corps sert de ressource alimentaire à d'autres organismes. Cette décomposition et cette dégradation de la matière organique forment un cycle de nutriments qui lie la mort à la vie dans un cycle continu. Les activités de la microflore et des détritivores (consommateurs animaux de matière morte) sont étroitement imbriquées et souvent synergiques,<sup>1</sup> ce qui permet de gagner considérablement en efficacité de dégradation. Ce gain d'efficacité, et donc la restitution rapide des éléments nutritifs au monde végétal est très importante pour la fertilité d'un écosystème.

Chez l'être humain, l'inhumation du corps constitue un écart important par rapport au processus de dégradation de la nature mentionné ci-dessus. L'inhumation dans un cercueil à une profondeur relativement importante ne permet pas aux détritivores d'accéder facilement au corps. C'est pourquoi la décomposition se fait souvent uniquement par les enzymes propres au corps (autolyse) et, pendant la phase de putréfaction et de décomposition, par les micro-organismes qui se sont installés dans le corps (surtout les bactéries intestinales). Cette situation contribue à une décomposition lente du corps. Cela n'a cependant pas d'effet sur le cycle des nutriments de la nature, car le corps humain est composé de trop peu de matière organique par rapport au métabolisme des nutriments d'un écosystème local (cf. chapitre 1.1 Composition de l'être humain et chapitre 4.3.3 Comparaisons quantitatives).

## 1.1. Composition de l'homme

La composition d'un corps a une influence sur sa décomposition. SCHMIDT (1969) attribue par exemple à la maigreur un effet inhibiteur de la putréfaction.<sup>2</sup> De plus, la composition du corps est intéressante pour obtenir des indications sur les produits de décomposition qui se forment. Les tableaux 1.1 à 1.3 rassemblent différentes informations sur la composition matérielle de l'être humain, qui se basent en partie sur les résultats d'analyse d'un seul corps (tableau 1.2) et en partie sur une moyenne d'un "être humain standard" (tableaux 1.1 et 1.3).

Organe	Poids (en g)
Graisse	10'000
Muscles	30'000
Squelette :	
Os	7'000
Rouge	
Moelle osseuse blanc	1'500
Moelle osseuse	1'500
Sang	5'400
Canal gastro- intestinal (sans contenu)	2'000
Poumons	1'000
Foie	1'700
Rein	300
Rate	150
Pankras	70
Thyroïde	20
Testes	40
Cœur	300
Glandes lymphatiques	700
Cerveau	1'500
Moelle épinière	30
Vessie	150
Glande salivaire	50
Yeux	30
Dents	20
Prostate	20
Surrénales	20
Thymus	10
Peau	2'100
Tissu conjonctif	4'100
<b>Poids corporel total</b>	<b>d'environ 70</b>

Tab. 1.1 : Répartition du poids chez le Homme "standard" (kg). Source : SCHMIDT (1969) : p. 202

	Pourcentage du Poids corporel	Eau (%)	Extrait d'éther (%)	Protéine brute (%)
Peau	7.8	64.7	13.0	22.2
Squelette	14.8	31.8	17.2	18.9
Dents	0.1	5.0		23.0
Muscles striés	31.6	79.5	3.4	16.5
Cerveau, moelle épinière	2.5	73.3	12.7	12.1
Foie	3.4	71.5	10.4	16.2
Cœur	0.7	73.7	9.3	15.9
Poumons	4.2	83.7	1.5	13.4
Rate	0.2	78.7	1.2	17.8
Reins	0.5	79.5	4.0	14.7
Pancréas	0.2	73.1	13.1	12.7
Tractus intestinal	2.1	79.1	6.2	13.2
Tissu adipeux	13.6	50.1	42.4	7.1
Autres tissus	17.4	75.5	12.3	14.0
Contenu de l'intestin	0.8			
Bile	0.2			
Cheveux	0.03			

Tab. 1.2 : Composition chimique du corps humain selon l'analyse d'un cadavre de 70,55 kg. Source : SCHMIDT (1969) : p. 202

Élément	Part du poids corporel total (en %)	Poids total (en g)
Oxygène	65.0	45'500
Carbone	18.0	12'600
Hydrogène	10.0	7'000
Azote	3.0	2'100
Calcium	1.5	1'050
Phosphore	1.0	700
Soufre	0.25	175
Potassium	0.2	140
Sodium	0.15	105
Chlore	0.15	105
Magnésium	0.05	35
Fer	0.006	4
Cuivre	0.0002	0.1
Manganèse	0.00003	0.02
Iode	0.00004	0.03
Total	99.3	69'514.2

Tab. 1.3 : Composition chimique du corps d'un "être humain standard" ( poids corporel total d'environ 70 kg). Source : SCHMIDT (1969) : p. 203

La substance quantitativement la plus importante dans le corps humain est l'eau, dont la proportion peut être calculée à 65% à l'aide des données du tableau 1.2. Le poids sec du corps analysé (70,55 kg de poids frais) s'élève donc à près de 25 kg. BERG, quant à lui, considère que le poids du corps humain est de 14 kg.<sup>3</sup> Sur un poids corporel également de 70,55 kg, cela donnerait une proportion d'eau de 80%. La marge de variation de la teneur en eau doit donc être considérée comme importante. Cela peut s'expliquer par le fait que la répartition de la musculature (env. 80% d'eau) et de la graisse (env. 50% d'eau) varie avec l'âge et l'état nutritionnel.<sup>4</sup> En outre, la teneur en eau des os semble pouvoir varier fortement.<sup>5</sup>

Les protéines représentent en moyenne la classe de substances organiques la plus importante. L'importance des protéines s'explique par la teneur moyenne relativement élevée en masse musculaire dans le corps humain, soit un peu plus de 40% (cf. tableau 1.1). La teneur en lipides n'est toutefois souvent pas beaucoup plus faible et constitue même la plus grande fraction organique du corps chez les personnes obèses. Les protéines et les lipides représentent toutefois clairement la majeure partie de la substance organique.

En ce qui concerne les composants inorganiques, on remarque tout d'abord la grande proportion de calcium, qui est un composant important du matériel osseux (cf. tableau 1.3). Dans le squelette, le calcium reste cependant lié pendant une longue période. Lors des analyses de la solution du sol sous les cadavres, c'est donc le potassium qui présente la plus grande concentration parmi les métaux alcalins et alcalino-terreux, devant le sodium, le calcium et le magnésium.<sup>6</sup>

## 1.2. Autolyse

La mort n'entraîne pas l'arrêt de tous les processus dans le corps. De nombreuses enzymes de l'organisme restent actives après la mort et continuent à catalyser différentes transformations chimiques telles que la glycolyse, la cyclisation, la formation de lactones ou la décomposition des protéines.<sup>7</sup> La dégradation des protéines se termine alors généralement par le clivage hydrolytique des chaînes peptidiques (protéolyse). En revanche, il n'y a pas de clivage des acides aminés.<sup>8</sup> Les processus de transformation par les enzymes de l'organisme sont appelés autolyse ou auto-dissolution.

Rapidement après le décès, une acidification se produit dans les tissus, les organes et les liquides corporels. En raison notamment de la formation glycolytique d'acide lactique, le pH passe d'une valeur initiale d'environ 7,4 à moins de 6.<sup>9</sup> Dès les premières heures suivant le décès, les structures supramoléculaires du corps subissent une profonde transformation.<sup>10</sup> Les processus de dissolution autolytique commencent à rendre les membranes cellulaires perméables. Des phénomènes de diffusion entre les contenus cellulaires et les substances intercellulaires se produisent.<sup>11</sup> Morphologiquement, il en résulte une liquéfaction générale des tissus mous. Les parois des organes creux et le tissu conjonctif deviennent également plus souples et plus minces.<sup>12</sup> La peau extérieure reste cependant assez intacte. Seules les cellules de l'épiderme sont détruites en relativement peu de temps.<sup>13</sup> Les fibres de collagène du derme et le tissu adipeux de stockage de l'hypoderme font en revanche partie des structures corporelles les plus stables face à l'autolyse.<sup>14</sup>

Les enzymes lysosomatiques jouent un rôle important dans les changements autolytiques. Les lysosomes sont les organes digestifs des cellules du corps.<sup>15</sup> Ils contiennent de grandes quantités d'enzymes, notamment des protéases qui décomposent les protéines et des lipases qui décomposent les graisses. De leur vivant, les lysosomes nettoient les cellules des corps étrangers et des composants cellulaires devenus superflus et les décomposent en acides aminés, en acides gras et en glucose. Après la mort, les membranes des lysosomes deviennent perméables, ce qui entraîne l'évacuation des enzymes dans la cellule et la dégradation des composants cellulaires.<sup>16</sup>

La vitesse des processus autolytiques dépend essentiellement de la température. L'activité optimale de la plupart des enzymes se situe entre 34 et 40°C.<sup>17</sup> Le refroidissement du cadavre permet donc de retarder les processus de dégradation du corps. La balsamisation, c'est-à-dire le traitement du cadavre avec des substances tannantes pour précipiter les enzymes à action autolytique, permet de retarder le processus de décomposition du corps, mais pas de l'empêcher.<sup>18</sup> Les poisons enzymatiques tels que le cyanure peuvent avoir le même effet. Le site DALDRUP<sup>19</sup> mentionne un cas de décès attribué à un empoisonnement au cyanure. Bien que le corps n'ait été découvert que 230 heures après le décès, aucune "odeur de cadavre" n'a pu être perçue dans l'appartement.

### 1.3. Pourriture et Décomposition

De notre vivant, la colonisation de micro-organismes se limite en grande partie aux parties du corps en contact direct avec le monde extérieur, comme la peau, la cavité buccale, les voies respiratoires, génitales et intestinales. Le gros intestin en particulier présente une densité bactérienne exceptionnellement élevée, avec  $10^{11}$  cellules par gramme de contenu intestinal.<sup>20</sup> En règle générale, on ne trouve pas de micro-organismes dans les organes, le sang et le système lymphatique.<sup>21</sup> La perméabilité des parois et des membranes due à l'autolyse favorise la propagation post-mortem des micro-organismes. C'est surtout à partir de l'abdomen qu'ils se répandent dans tout le corps et amorcent la phase de putréfaction. Les bactéries intestinales qui, de leur vivant, aidaient l'homme à digérer les aliments, digèrent désormais le corps lui-même. La flore de putréfaction se compose principalement de colibacilles, de levures et de moisissures, de staphylocoques, de streptocoques, de souches de protéines, de *Bacillus subtilis*, d'espèces de *Bacillus mesentericus*, de *Micrococcus albus liquefaciens*, de *Micrococcus pyogenes*, de *Clostridium perfringens*, de *Bacillus putrificus* et d'*Amylobacter*.<sup>22</sup>

L'activité bactérienne modifie le milieu physico-chimique du corps. La concentration de protons en est d'abord affectée : après une acidification de courte durée due à l'autolyse, la phase de putréfaction entraîne une alcalinisation qui dure des semaines, les valeurs de pH restant généralement inférieures à dix.<sup>23</sup> En outre, le processus de putréfaction entraîne une remontée de la température corporelle et la formation de gaz dans le corps.<sup>24</sup> Les changements dans le cadavre augmentent l'activité des enzymes du corps. L'ampleur de la contribution à la décomposition du cadavre, qui peut être attribuée à l'activité métabolique des bactéries, et l'importance des enzymes propres à l'organisme sont encore incomplètement élucidées.<sup>25</sup>

Dans la phase de putréfaction, c'est surtout un processus de décomposition anaérobie qui se déroule. Par rapport à l'autolyse, le spectre des réactions est nettement plus large. Cela s'explique d'une part par la diversité des enzymes qui, outre celles produites par l'organisme, comprennent désormais aussi celles d'origine bactérienne. D'autre part, les modifications mentionnées ci-dessus concernant la température du cadavre et la concentration de protons favorisent le processus de dégradation. Pour la dégradation des protéines, cela signifie qu'il n'y a plus seulement une protéolyse, mais que les acides aminés libérés sont également dégradés. Avec la désamination et la décarboxylation, deux voies de dégradation sont principalement en discussion. Les expériences de

DALDRUP ont montré que les produits de décarboxylation des acides aminés n'étaient généralement trouvés que lorsque le pH était nettement décalé vers l'acide. En revanche, dans la zone alcaline, les réactions de dégradation désaminantes ont conduit à une dégradation rapide et complète des amines et des acides aminés libres.<sup>26</sup>

Les produits de dégradation des acides aminés suivants ont été trouvés dans des organes en putréfaction :<sup>27</sup>

*amines rarement ou sporadiquement trouvées :*

**Agmatine** (de l'arginine),  **$\beta$ -phényléthylamine** (de la phénylalanine), **isoamylamine** (de la leucine)

*régulièrement, mais le plus souvent après une putréfaction avancée et en milieu acide, des amines retrouvées :*

**Putrescine** (de l'ornithine), **cadavérine** (de la lysine), **tyramine** (de la tyrosine), **éthanolamine** (de la sérine)

*Acides aminés dont la concentration varie en fonction de la durée de décomposition :*

**Ornithine** (de l'arginine), **acide  $\alpha$ -aminobutyrique** (de l'acide glutamique), **acide  $\nu$ -aminobutyrique** (de l'acide glutamique), **acide  $\delta$ -aminovalérique** (de la proline ou de l'ornithine)

*acides aminés régulièrement trouvés :*

**$\beta$ -alanine** (à partir de l'acide aspartique), **taurine** (à partir de la cystéine)

*acide aminé détecté de manière isolée :*

**Acide urocanique** (à partir de l'histidine)

*autres produits de dégradation des acides aminés :*

**Ammoniac** (forte augmentation de la concentration, déjà quelques heures après le décès),  
**urée**

Après les protéines, les graisses sont la deuxième catégorie de substances la plus importante du tissu mou humain. Les graisses sont décomposées par les enzymes lipase, estérase et hydrolase,<sup>28</sup>. Les graisses neutres sont transformées en glycérol et en acides gras, les phosphatides sont en outre transformés en acides gras saturés.

choline, la colamine et l'acide phosphorique sont libérés.<sup>29</sup> Bien que les acides gras soient très énergétiques

sont des composés riches en acides gras, leur dégradation constitue néanmoins un point critique dans le cadre de la décomposition des cadavres. Par  **$\beta$ -oxydation**, ils peuvent être dégradés en acides gras plus courts. A la fin de la phase de putréfaction, on trouve alors souvent comme produits de décomposition les acides caproïque et butyrique et probablement aussi l'acide acétique.<sup>30</sup> Dans des conditions défavorables, les acides gras à longue chaîne ne sont pas seulement conservés, ils peuvent également empêcher le processus de putréfaction. Les raisons possibles de ce phénomène sont expliquées en détail au chapitre 2 (Conservation des acides gras). Une liste des catabolites cadavériques est présentée à l'annexe C.

Dans un premier temps, la liquéfaction autolytique des tissus mous se poursuit et s'intensifie au cours du processus de putréfaction. Dans un deuxième temps, la putréfaction s'accompagne d'une perte importante de liquide dans le corps. Ce n'est qu'après cette étape que la décomposition finale de la décomposition du corps commence avec la décomposition oxydative des restes de tissus. La déshydratation du corps se déroule en deux étapes :

1. Tout d'abord, des liquides s'accumulent à différents endroits du corps :<sup>31</sup> Dans les cavités thoraciques, on peut trouver 500 millilitres ou plus de liquide de putréfaction. Dans la

---

Processus de décomposition chez  
Homme  
cavité abdominale, le liquide s'accumule après le ramollissement de la paroi gastrique.

Le contenu de l'estomac s'accumule avec la graisse liquéfiée et les exsudats aqueux. En outre, les bulles de putréfaction de la peau peuvent également contenir une grande quantité de liquide (100 ml ou plus). Ces liquides de putréfaction contiennent des quantités variables de protéines et de leurs produits de dégradation, de graisses et d'acides gras, ainsi que de nombreux autres composants du corps et de la flore cadavérique.<sup>32</sup>

2. Dans un deuxième temps, les liquides de putréfaction accumulés sont expulsés du corps. Cela se fait par un fort dégagement de gaz dû à la putréfaction (surtout du méthane et d'autres hydrocarbures, de l'ammoniaque, du sulfure d'hydrogène et du dioxyde de carbone), ce qui provoque une dislocation du corps. En peu de temps, cela peut entraîner une augmentation considérable de la pression interne dans le corps.<sup>33</sup> Les intestins, l'estomac et la cavité abdominale sont alors de plus en plus comprimés. Le sang du cadavre parvient au cœur par compression des vaisseaux sanguins et de là aux poumons. En raison de la défaillance de la fonction de la membrane à la limite des alvéoles pulmonaires et des vaisseaux sanguins, le sang et le liquide pulmonaire généralement présent sont en partie expulsés des ouvertures respiratoires, en partie également comprimés à travers la surface des poumons. Mais la plupart du sang sort de la bouche et du nez par cette voie après une forte putréfaction.<sup>34</sup> En outre, la pression des gaz vide également la vessie, les intestins, l'estomac et même l'utérus ("accouchement en cercueil") si les voies d'accouchement sont déjà dilatées.<sup>35</sup>

Avec la perte importante de liquide du cadavre, les processus de décomposition aérobies augmentent : la putréfaction est progressivement remplacée par la décomposition. Durant cette phase de décomposition du corps, une forme tardive de la flore et de la faune cadavériques doit souvent se développer, mais la littérature consultée n'en parle pas de manière détaillée.<sup>36</sup> On y trouve uniquement des indications sur les moisissures, que l'on trouve régulièrement dans les tombes en terre après avoir atteint le stade de l'abandon. Les moisissures peuvent alors être extrêmement denses et atteindre plus d'un centimètre d'épaisseur.<sup>37</sup>

Outre les moisissures, les bactéries aérobies sont de plus en plus présentes dans la phase de décomposition. Différents composés qui sont très stables dans des conditions anaérobies (p. ex. les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques saturés) devraient être dégradables en aérobiose dans cette phase tardive de la décomposition du cadavre. La décomposition permet d'atteindre la squelettisation complète du cadavre. Dans le sol, il reste essentiellement des acides humiques, des restes de cartilage et de tissu conjonctif ainsi que le squelette, qui peut encore contenir des composants organiques stockés dans la moelle osseuse.<sup>38</sup>

## 1.4. Temps nécessaire

Dans des "conditions normales", c'est-à-dire dans un sol perméable et aéré, la décomposition d'un corps dans une tombe en terre dure entre 5 et 7 ans.<sup>39</sup> Mais l'éventail des durées de décomposition possibles est large et va de quelques semaines (à la surface de la terre à une température ambiante chaude) à bien plus de 100 ans (par exemple en cas de conservation des acides gras). Certains des facteurs qui influent sur le taux de décomposition des cadavres sont abordés ci-après.

### 1.4.1. Insectes

La consommation d'animaux a une forte influence accélératrice sur la décomposition. Il faut souligner ici l'importance des larves d'insectes.<sup>40</sup> Les asticots sont capables, dans des conditions adéquates (bonne accessibilité au cadavre et températures favorables), de contribuer principalement à la destruction des parties molles. Certaines espèces de mouches (surtout *Musca domestica*, *Musca corvina*, *Muscina stabulans* et *Muscina pabulorum*) pondent leurs œufs sur le cadavre peu après la mort. Les parties du corps préférées sont facilement accessibles et humides, notamment les fentes palpébrales, les coins des yeux, les narines et les coins de la bouche, ainsi que les éventuelles plaies. Dans des conditions favorables, les premières larves éclosent au bout de 10 à 24 heures et se nourrissent dans les profondeurs du corps à travers les muqueuses molles.

Les larves d'insectes peuvent également coloniser un cadavre dans le sol. Dans le cadre d'une expérience, RODRIGUEZ/BASS (1985) ont observé les processus de décomposition de six cadavres enterrés sans cercueil sur un site d'étude dans le Tennessee (USA). Les inhumations ont eu lieu dans les 48 heures suivant le décès. Pendant ce temps, les insectes charognards ont été tenus à l'écart des six corps. Pour les corps 1 à 6, dont l'inhumation a eu lieu à différentes saisons et profondeurs de sol, l'annexe A présente un aperçu des principales données et observations.

Pour les corps 1 et 2, enterrés respectivement à 1,2 et 0,6 mètre de profondeur, aucun insecte n'a pu être trouvé sur le corps. Ce n'est qu'à une profondeur de 0,3 mètre (corps 3 à 6) que des insectes saprophages (espèces de mouches de l'ordre des diptères) ont pu localiser les corps et les coloniser. Dans le cadavre 3, enterré en août, on a pu constater une plus grande activité des insectes que dans les cadavres 4 à 6 enterrés durant le semestre d'hiver. La comparaison de l'état des cadavres 2 et 3 permet de constater l'importance de l'activité des insectes. Alors que le cadavre 3 est déjà fortement décomposé après trois mois, le cadavre 2 ne montre que peu de signes de décomposition après six mois. Cette comparaison illustre bien l'effet de l'activité des insectes, dans la mesure où le deuxième facteur important, à savoir la température initiale, correspond à peu près aux deux cadavres.

L'activité des insectes aasinés dépend essentiellement de la profondeur d'inhumation et de la date d'enterrement. Dans les cimetières suisses, les enterrements ont généralement lieu à une profondeur de 1,5 à 2 mètres. Les conditions sont donc défavorables à une colonisation d'insectes dans la tombe, d'autant plus que le cercueil rend l'accès au corps difficile. Cependant, des collembolles (collembolles) ont déjà été trouvés dans un cimetière à 2 mètres de profondeur, alors que leur habitat normal se trouve dans les 10 premiers centimètres du sol.<sup>41</sup> Selon BERG, il n'existe que peu d'informations sur les lois de la faune funéraire, dont la validité générale est en outre contestée.<sup>42</sup> Dans le cas d'inhumations à grande profondeur, l'activité de décomposition des insectes n'est cependant pas très importante, comme nous l'avons vu précédemment. La durée de décomposition s'étendra donc au moins sur quelques années.

### 1.4.2. Température

Des températures corporelles élevées entraînent des taux de décomposition des cadavres plus importants. Cette relation est due à la dépendance de la température de l'activité des bactéries et des enzymes.



(voir figure 2.3). Jusqu'au début de la putréfaction intensive, la température du corps est déterminée en grande partie par la température du sol. Après le début du processus de putréfaction, la température du cadavre s'élève au-dessus du niveau de température du sol en raison de l'activité biochimique. L'augmentation moyenne de la température peut être considérée comme une mesure de l'intensité du processus de putréfaction.

L'effet de la température du sol sur le taux de décomposition peut être mesuré dans le dispositif expérimental de RODRIGUEZ/BASS (1985) en comparant les cadavres 1 et 2 (voir données en annexe A). L'augmentation moyenne de la température est de 1,6°C plus élevée pour le cadavre 2 que pour le cadavre 1. La décomposition est donc plus avancée pour le cadavre 2. La cause de ce processus de décomposition plus important est probablement due principalement à la température de départ plus élevée de 7°C. Après la disparition de la phase de décomposition intensive, la chaleur corporelle est à nouveau déterminée de manière déterminante par la température du sol.<sup>43</sup> Des explications plus détaillées sur l'effet de la température sur un processus de dégradation bactérienne ou enzymatique sont données dans le deuxième chapitre (cf. chap. 2.5.2. Température corporelle).

### 1.4.3. Produits chimiques et Médicaments

Différents produits chimiques et médicaments ont un effet négatif sur le taux de décomposition. Nous avons déjà mentionné plus haut les cyanures qui, en tant que poison enzymatique, entravent aussi bien l'autolyse que la putréfaction. D'autres poisons enzymatiques et substances bactéricides peuvent être cités ici comme empêchant la décomposition, comme le monoxyde de carbone, l'acide fluorhydrique, la strychnine, la cicutoxine, les désinfectants et les antibiotiques.<sup>44</sup> En raison de leur grande diffusion et de leur effet spécifiquement bactéricide, les antibiotiques seront pris ici comme exemple et leur influence sur le processus de décomposition sera examinée de plus près.

Après des traitements antibiotiques, on a constaté des retards parfois importants dans les processus de décomposition post-mortem.<sup>45</sup> En raison de leur effet antibactérien, il serait logique de supposer que ces retards sont dus à une inhibition de la flore cadavérique. Il ne semble toutefois pas y avoir d'indices suffisants pour une telle évolution. Selon WAGNER (1960), les méthodes d'analyse de l'époque ne permettaient généralement plus de détecter les antibiotiques après 6 à 8 jours post-mortem.<sup>46</sup> Il peut donc tout au plus affirmer un effet antibactérien spécifique pour les 8 premiers jours post-mortem.<sup>47</sup> D'autres effets des antibiotiques sur l'organisme doivent être trouvés pour expliquer les retards dans le processus de décomposition. Selon WAGNER, il s'agit d'une influence "non spécifique" sur les processus métaboliques des tissus.<sup>48</sup> Une description plus précise de cette influence n'a cependant pas pu être trouvée dans la littérature consultée.

Selon BERG, des expériences sur des animaux ont certes permis d'obtenir une certaine inhibition de la putréfaction par des doses élevées de streptomycine, et encore plus clairement par un traitement prémortel à la tétracycline, mais pas d'inhibition de la croissance des germes.<sup>49</sup> Pour la pratique funéraire, l'administration d'antibiotiques ne semble pas avoir une grande importance pour des raisons de dosage, et plus encore en raison de la perte d'efficacité et de la dégradation rapides.<sup>50</sup> La perte d'efficacité dans le corps vivant est confirmée par une expérience avec la pénicilline G, qui a montré que 60% de la dose est déjà éliminée dans l'urine en l'espace de cinq heures.<sup>51</sup>

Les informations disponibles ne permettent pas de se faire une idée précise de l'effet global des antibiotiques sur la décomposition des cadavres. La perte rapide d'efficacité des antibiotiques semble certes incontestée, ce qui justifie le pronostic positif de BERG concernant la décomposition des cadavres (voir ci-dessus). Mais les effets de l'influence "non spécifique" sur la pratique funéraire restent discutables. Chez une femme qui avait été traitée avant sa mort avec des antibiotiques (pendant 15 jours avec de la supracilline et plus tard pendant 7 jours avec une capsule d'achromycine toutes les 6 heures), une exhumation et une autopsie ont eu lieu environ 13 mois après la mort. Les organes internes ont été remarquablement bien conservés, tandis que l'extérieur du corps était recouvert d'une vaste couche de moisissure blanchâtre.<sup>52</sup> La bonne conservation des organes internes indique une faible dissolution autolytique des tissus. Cela pourrait correspondre aux influences "non spécifiques" sur les processus métaboliques, telles qu'elles ont été postulées par Wagner (voir ci-dessus). La preuve d'un lien de cause à effet avec l'administration d'antibiotiques doit cependant encore être apportée. Il devrait être possible de trouver des informations supplémentaires à ce sujet dans la littérature récente. En outre, il convient d'examiner sur quel horizon de temps une telle inhibition éventuelle de la décomposition peut s'étendre.

#### **1.4.4. Momification**

Lors de la momification, la déshydratation des tissus mous permet de stopper les processus de putréfaction et donc la décomposition du corps. La présence d'air en mouvement, qui entraîne rapidement l'évaporation de l'humidité, est le facteur essentiel de la déshydratation précoce.<sup>53</sup> La momification des corps enterrés peut se produire surtout dans les tombes de sable des zones chaudes ou dans les caveaux et les voûtes sèches.<sup>54</sup> La momification en tant que trouble de la décomposition est toutefois extrêmement rare sous nos latitudes.

### **Questions ouvertes**

- Quelle est l'importance des bactéries dans le processus de décomposition, par rapport à l'activité de décomposition des enzymes du corps ?
- Quelles sont les souches bactériennes qui jouent un rôle particulièrement important dans la décomposition des cadavres ?
- Ces espèces présentent-elles des sensibilités différentes aux basses températures ? Des bactéries de putréfaction importantes peuvent-elles disparaître complètement suite à des températures basses prolongées ?
- Une succession de micro-organismes a-t-elle lieu au cours de la décomposition des cadavres ?
- Dans quelle plage de température la décomposition du corps se déroule-t-elle de manière optimale ?

- <sup>1</sup>Bégon (1991) : p. 426  
<sup>2</sup>Schmidt (1969) : p. 193. Voir à ce sujet la discussion dans le chapitre Conservation des acides gras : richesse et répartition des graisses.  
<sup>3</sup>Berg (1975) : p. 88  
<sup>4</sup>voir Schmidt (1969) : p. 201  
<sup>5</sup>loc. cit.  
<sup>6</sup>cf. Vass (1992) : p. 1244  
<sup>7</sup>Schmidt (1969) : p. 190  
<sup>8</sup>cf. Berg (1975) : p. 63  
<sup>9</sup>cf. Schmidt (1969) : p. 191 et Daldrup (1978) : p. 11  
<sup>10</sup>Schmidt (1969) : p. 190  
<sup>11</sup>loc. cit.  
<sup>12</sup>loc. cit.  
<sup>13</sup>cf. Berg (1975) : p. 67  
<sup>14</sup>cf. Schmidt (1969) : p. 190  
<sup>15</sup>cf. Schmidt (1983) : p. 32 et s.  
<sup>16</sup>Dorn/Hopkins (1985) : p. 198 s. Cf. également Schmidt (1983) : p. 33  
<sup>17</sup>Berg (1975) : p. 63  
<sup>18</sup>Mann (1990) : p. 108  
<sup>19</sup>Daldrup (1978) : p. 39 (n° 15)  
<sup>20</sup>Schlegel (1992) : p. 578  
<sup>21</sup>voir Brock (1991) : p. 388  
<sup>22</sup>Daldrup (1978) : p. 4  
<sup>23</sup>Schmidt 1969) : p. 209  
<sup>24</sup>cf. Berg (1975) : p. 68 s.  
<sup>25</sup>cf. Berg (1975) : p. 67 s.  
<sup>26</sup>Daldrup (1978) : p. 41  
<sup>27</sup>Daldrup (1978) : p. 231 s.  
<sup>28</sup>Schmidt (1969) : p. 193  
<sup>29</sup>Berg (1975) : p. 71  
<sup>30</sup>loc. cit.  
<sup>31</sup>cf. Schmidt (1969) : p. 198  
<sup>32</sup>Schmidt (1969) : p : 198  
<sup>33</sup>Berg (1975) : p. 75  
<sup>34</sup>Schmidt (1969) : p. 197  
<sup>35</sup>op. cit., voir aussi Berg (1975) : p. 75  
<sup>36</sup>cf. Berg (1975) : p. 79  
<sup>37</sup>Schmidt (1969) : p. 194  
<sup>38</sup>cf. Schmidt (1969) : p. 194  
<sup>39</sup>Berg (1975) : p. 93  
<sup>40</sup>voir à ce sujet Berg (1975) : p. 80 et suivantes.  
<sup>41</sup>Janaway (1987) : p. 131 s.  
<sup>42</sup>Berg (1975) : p. 85  
<sup>43</sup>voir Rodriguez/Bass (1985) : p. 841 s.  
<sup>44</sup>Schmidt (1969) : p. 193  
<sup>45</sup>cf. Wagner (1961) : p. 573  
<sup>46</sup>Wagner (1960) : p. 719  
<sup>47</sup>Wagner (1961) : p. 573  
<sup>48</sup>cf. Wagner (1961) : p. 580  
<sup>49</sup>Berg (1975) : p. 69  
<sup>50</sup>loc. cit.  
<sup>51</sup>Brock (1994) : p. 427  
<sup>52</sup>Reh (1960) : p. 720 s.  
<sup>53</sup>Berg (1975) : p. 87  
<sup>54</sup>loc. cit.



## 2. F CONSERVATION DE L'ACIDE ÉTHYLIQUE

### Résumé

Le processus de conservation des acides gras (formation d'adipocytes) n'a jamais été étudié de manière systématique jusqu'à présent et n'est donc pas entièrement compris. Des études individuelles et une multitude d'observations permettent néanmoins de tirer quelques conclusions sur ce processus. La formation d'adipocytes désigne une transformation du tissu adipeux par des enzymes bactériennes, qui consiste essentiellement en une transformation des acides gras non saturés en acides gras saturés. Au fur et à mesure que la saturation se poursuit, le point de fusion du mélange d'acides gras diminue, ce qui entraîne une précipitation continue des acides gras à longue chaîne et donc un durcissement de la graisse.

La saturation des acides gras a toutefois également lieu dans le cadre de la décomposition "normale" des cadavres. L'orientation vers la décomposition cadavérique ou la conservation des acides gras est prise pendant le processus de putréfaction. Un processus de putréfaction intense permet de décomposer les acides gras saturés et de retirer ainsi le substrat de la conservation des acides gras. L'intensité du processus de putréfaction et donc la sensibilité de la décomposition des cadavres sont essentiellement liées à la température du corps. En raison de la grande activité biochimique, le corps commence à se réchauffer après le début de la putréfaction, ce qui crée un gradient de température par rapport au sol environnant et donc un flux de chaleur qui s'éloigne du cadavre. L'ampleur de ce transfert de chaleur devrait avoir une importance décisive pour la suite de la décomposition du cadavre. En cas d'accumulation de liquides corporels dans le cercueil - ce qui peut se produire dans des sols humides ou dans des cercueils pratiquement hermétiques - l'arrivée d'eau libre renforce le transport de chaleur. Par conséquent, le réchauffement du corps dû à la putréfaction ne se produit que dans une mesure réduite, ce qui limite la force du processus de décomposition. Il faut notamment partir du principe que les acides gras saturés ne peuvent pas être décomposés en grande partie. Au lieu de la décomposition, on assiste à la précipitation des acides gras mentionnée ci-dessus. La masse lipidique solide qui en résulte, appelée adipocire, ainsi que les tissus mous qui y sont enfermés s'avèrent très persistants et peuvent échapper au processus de décomposition pendant plusieurs décennies.

Dans un manuel d'hygiène de 1912, la "formation de cire cadavérique" est un processus de décomposition anormal qui se caractérise par le fait que "des parties plus ou moins étendues des parties molles, parfois même celles-ci dans leur ensemble, sont transformées en une substance blanche ou gris-blanc, grumeleuse, inodore ou dégageant une odeur de moisi, grasse au toucher, d'un poids très faible et qui peut être si dure qu'elle résonne quand on frappe dessus".<sup>1</sup> La formation de cire grasse, mieux appelée conservation des acides gras, mais aussi formation d'adipocire et de lipides cadavériques, est le principal trouble de la décomposition dans nos cimetières. Son apparition s'accompagne d'une forte réduction du taux de décomposition. Même après des décennies d'inhumation, des corps en cire grasse ont été exhumés alors qu'ils étaient si bien conservés qu'ils auraient pu être facilement identifiés.<sup>2</sup> La dégradation de la lipide cadavérique peut s'étendre sur plus de 100 ans.<sup>3</sup> Bien que la formation de cire grasse soit ressentie comme gênante et qu'elle ait donné lieu à de coûteux travaux de rénovation des cimetières, les décideurs ne disposent que de peu d'informations à ce sujet. L'un des objectifs de ce chapitre est de combler ce déficit et de mettre à la disposition des services funéraires et d'autres personnes intéressées les connaissances acquises dans le domaine de la médecine légale.

## 2.1. Mécanisme

La conservation des acides gras est un processus de transformation lent et continu du tissu adipeux, qui part de l'enveloppe corporelle et progresse vers l'intérieur.<sup>4</sup> Le mécanisme de ce processus n'est pas encore entièrement compris. La liste suivante donne un aperçu de la manière dont l'adipocire peut se former :

1. Pendant les premiers jours suivant la mort, des lipases endogènes décomposent les triglycérides en acides gras et en glycérol.
2. Avec le processus de putréfaction, les bactéries intestinales se propagent dans le corps.
3. Les enzymes bactériennes favorisent l'hydrolyse des graisses corporelles et donc la libération d'acides gras.
4. Les acides gras liquides se diffusent partiellement dans le tissu musculaire et les organes internes.
5. Les enzymes bactériennes catalysent la transformation des acides gras. La transformation la plus importante concerne l'acide oléique, qui est transformé en acide palmitique par un raccourcissement de chaîne  $\beta$ -oxydatif suivi d'une hydrogénation (cf. figure 2.1). Une réaction moins déterminante peut être une hydratation (éventuellement avec déshydrogénation supplémentaire) en acide gras hydroxy (respectivement oxo) (cf. fig. 2.2). Les deux voies de réaction entraînent la suppression des doubles liaisons. Certains acides gras peuvent en outre se polymériser en dimères et oligomères.<sup>5</sup> Ces différents processus conduisent à un durcissement de la graisse.
6. Le durcissement de la graisse commence dans le tissu adipeux sous-cutané, d'où il peut progresser vers l'intérieur du corps.
7. Le processus de putréfaction, qui part de l'intérieur du corps, s'arrête.
8. Il en résulte une carapace lipidique qui préserve plus ou moins la forme extérieure du corps.<sup>6</sup> Les tissus musculaires ou les organes internes peuvent également être conservés, pour autant qu'ils soient pénétrés par les acides gras liquides et ainsi  
Le processus de conservation des acides gras doit être inclus dans le processus de production.<sup>7</sup>

Les points 1 à 3 font partie du processus normal de décomposition. Sans ces processus de décomposition du corps, aucune conservation des acides gras n'est envisageable. En libérant des acides gras (points 1 et 3), ils fournissent le substrat de départ pour le processus de conservation et, avec les enzymes bactériennes, les catalyseurs nécessaires aux processus de transformation chimique. La formation d'adipocytes proprement dite consiste en la transformation des acides gras insaturés en acides gras saturés et donc en l'hydrogénation (éventuellement l'hydratation) de la double liaison. Les points 7 et 8 sont des effets de la conservation des acides gras.

On suppose que la principale bactérie impliquée est *Clostridium perfringens*,<sup>8</sup> dont le contribueraient de manière particulièrement efficace au durcissement de la graisse.<sup>9</sup> En outre, la littérature mentionne *Staphylococcus albus* et *Proteus vulgaris* comme adipocireurs.<sup>10</sup> Cette liste n'est toutefois pas exhaustive.

## 2.2. Durcissement de la graisse

L'acide oléique, qui est proportionnellement l'acide gras le plus important dans le corps humain (cf. tableau 2.1, 2e colonne), semble jouer un rôle particulièrement important dans la formation d'adipocytes. Il est considéré comme la principale substance de départ. Le processus essentiel de la formation d'adipocytes devrait être un durcissement des graisses catalysé par des enzymes bactériennes, c'est-à-dire une augmentation du degré de saturation des acides gras. Comme le montre le tableau 2.1, les acides gras saturés ont des points de fusion plus élevés que leurs équivalents insaturés.

Le changement le plus frappant dans la composition des acides gras pendant la formation de l'adipocire est la diminution de l'acide oléique (de 48 à 22 pour cent), qui est manifestement transformé principalement en acide palmitique (de 26 à 53 pour cent). Les pourcentages indiqués ne doivent toutefois être considérés que comme des instantanés. Ils se réfèrent aux conditions d'essai correspondantes et surtout au temps de repos écoulé. En

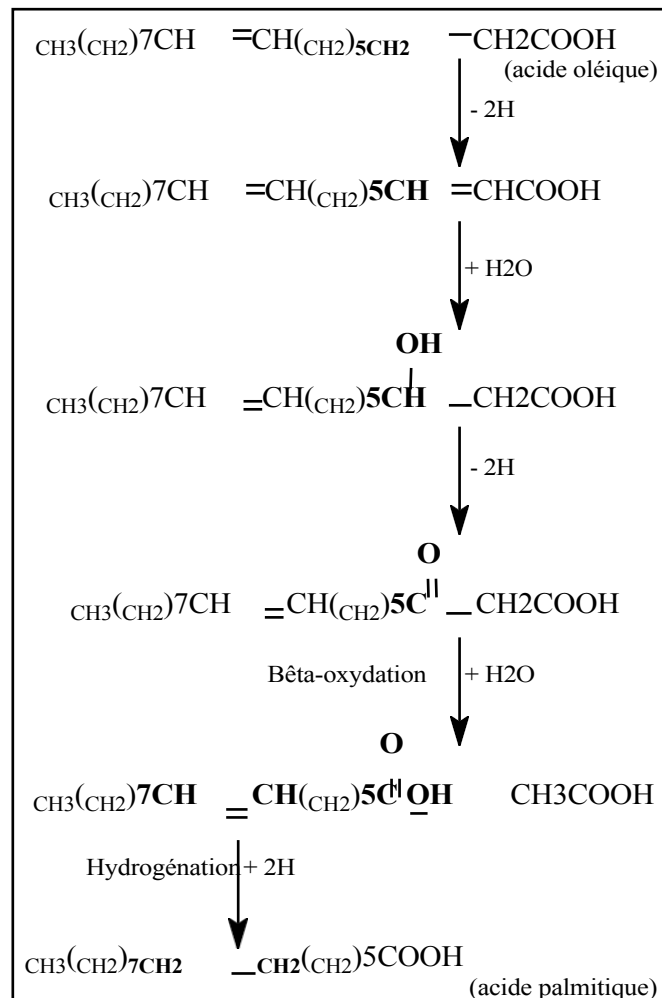


Fig. 2.1 : Schéma de réaction simplifié de la transformation de l'acide oléique en acide palmitique. Source : BERG (1975) : p. 91

En effet, le quotient acide oléique/acide palmitique tend de plus en plus vers zéro au fur et à mesure que l'âge adipocire passe d'un peu moins de deux ans.<sup>11</sup> Un mécanisme de réaction plausible pour la lente transformation de l'acide oléique en acide palmitique est présenté dans la figure 2.1.

L'influence de cette transformation sur le point de fusion des acides gras est importante. Si l'on ne considère que les composants principaux, le point de fusion de l'acide palmitique nouvellement formé dépasse de près de 50°C celui de la substance précédente. Il va de soi que les acides gras ne sont pas purs, mais dissous les uns dans les autres. Le point de fusion réel résulte donc de la composition du mélange d'acides gras.

Outre l'hydrogénation des acides gras insaturés en cis-9 (par ex. l'acide oléique), une hydratation suivie éventuellement d'une déshydrogénation peut également se produire au niveau de la double liaison. Une représentation schématique de ces processus est donnée dans la figure 2.2.

Au cours de ce processus, les produits formés à partir de l'acide oléique sont l'acide 10-hydroxy- et 10-oxo-stéarique, tandis que l'acide palmitoléique donne l'acide 10-hydroxy- et 10-oxo-palmitique. Dans des essais en laboratoire, TAKATORI (1987) a déterminé des taux de conversion expérimentaux avec la bactérie *Micrococcus luteus*. Comme on peut le voir dans le tableau 2.2, les résultats concernent

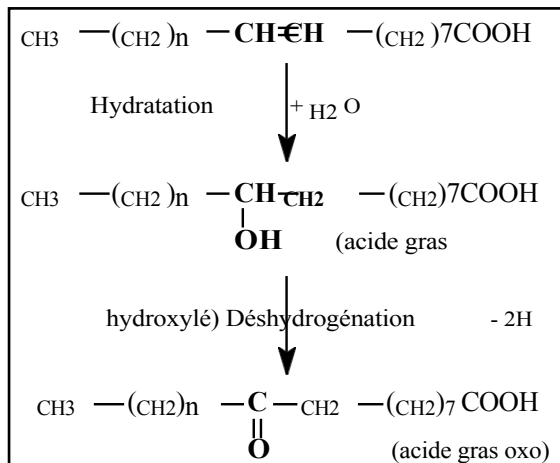


Fig. 2.2 : Brève représentation de la formation de l'hydroxy- et oxo-acides gras. Source : TAKATORI (1987) : p. 280

Les transformations les plus importantes sont l'acide palmitoléique, qui se présente à 56,3 pour cent sous la forme oxo, et l'acide oléique, avec le même pourcentage sous la forme hydroxy.<sup>12</sup> La formation des acides 10-hydroxy et 10-oxostéarique a pu être démontrée en laboratoire avec des bactéries intestinales humaines.<sup>13</sup> L'hydratation n'a eu lieu que pour les acides gras qui présentaient une double liaison cis-9. Comme le montre l'exemple de l'acide linoléique dans le tableau 2.2, même la présence d'une deuxième double liaison empêche la déshydratation et donc la formation de la forme oxo.<sup>14</sup> L'hydratation et la déshydrogénation conduisent également à une augmentation du point de fusion.

Dans des conditions de laboratoire sont donc deux processus de transformation de l'insaturé

acides gras ont été observés. La voie de réaction qui intervient dans le cadavre dépend des conditions de réaction et surtout des enzymes présentes. Il ressort de différentes analyses chimiques du lipide cadavérique que l'hydrogénation de la double liaison cis-9 (fig. 2.1) doit avoir un poids nettement plus important que l'hydratation (fig. 2.2) (voir paragraphe suivant).



Acide gras	Salaire en graisse sous-cutanée (fraîche) <sup>15</sup> %	adipocire expérimental <sup>16</sup> %	Point de fusion <sup>17</sup> °C	Remarques <sup>18</sup>
<i>1. les acides gras saturés</i>				
Acide laurique (C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> )	2.0	2.0	43.5	
Acide myristique (C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> )	6.0	7.0	54.4	Partie intégrante de presque tous les Graisses animales (1-5%)
Acide pentadécylrique (C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> )	0.5	0.5	52.1	
Acide palmitique (C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> )	26.0	53.0	62.85	Partie intégrante de presque tous les Grosse
Acide margarique (C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> )	1.0	1.0	62	
Acide stéarique (C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> )	7.5	9.0	69.6	
Acide arachidique (C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub> )	1.5	1.5	75.4	
<i>2. Acides gras insaturés</i>				
Acide palmitoléique (C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub> )	5.0	2.0	1	dans le dépôt et la laiterie graisse d'animaux
Acide oléique <sup>ii</sup> (C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub> )	48.0	22.0	13	le plus répandu des acides gras insaturés Acide gras
C <sub>20</sub> , 1 chambre double fixation	2.0	2.0		
C <sub>20</sub> , plusieurs dop-Reliures en peluche	0.5			probablement Arachidon-acide

Tab. 2.1 : Substances de départ et produits de la formation d'adipocire avec indication de leur point de fusion. Les données sur la composition des acides gras illustrent qualitativement les changements qui se produisent après une courte période de repos. Le lipide cadavérique a été obtenu en stockant pendant deux mois de la graisse humaine fraîche dans de l'eau, en ajoutant des sels nutritifs et des cultures bactériennes.

Tab. 2.2 : la conversion relative en acides gras 10-hydroxy et 10-oxo dans l'expérience de laboratoire par *M. luteus*. D'après TAKATORI (1987) : p. 280

Substrat	Taux de conversion relatif du substrat (en %)	
	Acide gras 10-hydroxy	Acide gras 10-oxo
Acide myristoléique	7.0	5.2
Acide palmitoléique	8.1	56.3
Acide oléique	56.3	16.8
Acide linoléique	57.7	0

- 
- <sup>i</sup> acide  $\Delta^9$ -hexadécénoïque
  - <sup>ii</sup> Acide cis- $\Delta^9$ -octadécénoïque

### 2.3. Composition chimique et morphologie de Adipocire

Les lipides cadavériques ont déjà été étudiés à plusieurs reprises quant à leur composition chimique. Le tableau 2.1 (troisième colonne) présente la composition d'un adipocire expérimental après une courte période de développement. Les modifications de substrat qui y sont constatées correspondent - du moins en ce qui concerne les transformations les plus importantes - aux résultats des analyses de lipides cadavériques. Ainsi, l'acide palmitique est également considéré dans d'autres sources comme le composé quantitativement le plus important. Les données concernant la composition ultérieure ne sont pas homogènes.

Chez SCHMIDT (1969)<sup>19</sup>, la proportion d'acide palmitique est de 70%, les acides stéarique et oléique de 10%.

sont indiqués à hauteur de 5 % chacun. Ces chiffres dépendent toutefois parfois de la durée d'immobilisation du corps. Les sels d'acides gras sont indiqués à 10 pour cent, avec comme cations le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium et l'ammonium. (En supposant qu'il s'agit principalement d'hexadécanoate de Ca, cela donne une proportion inorganique d'un bon pour cent en poids). La quantité de cholestérol n'est pas indiquée.

Sur la base d'une recherche bibliographique, BERG (1975)<sup>20</sup> cite, outre l'acide palmitique, le stéaric acide riche comme deuxième composant principal. Les autres composants ne sont représentés qu'en petites quantités : L'acide oléique et les substances inorganiques, dans lesquelles le calcium prédomine, sont mentionnés. BERG a rencontré ces résultats dans différents travaux. En revanche, il n'a trouvé que quelques mentions de l'acide hydroxystéarique et du cholestérol.

Le point de départ de la formation de l'adipocire se situe dans le tissu adipeux sous-cutané. C'est là que commence la transformation et la cristallisation des acides gras après la liquéfaction des graisses corporelles.<sup>21</sup> La masse lipidique molle initiale se transforme en une carapace lipidique dure, ce qui est manifestement lié à la transformation progressive de l'acide oléique en acides gras saturés. Ce processus s'accompagne d'une conservation plus ou moins poussée des formes extérieures du corps.<sup>22</sup> Outre le durcissement de la carapace lipidique, l'adipocire se développe en profondeur dans le corps. Des parties de la musculature et des organes internes, dont les tissus sont imprégnés de graisse liquéfiée, peuvent être impliquées dans le processus de conservation des acides gras.<sup>23</sup> Dans la plupart des cas, on observe que seules les couches musculaires internes sont dissoutes dans les cadavres de cire grasse, ce qui est dû à la putréfaction qui s'étend simultanément de l'intérieur vers l'extérieur. Le processus de putréfaction est probablement stoppé par la progression des lipides cadavériques. Morphologiquement, il en résulte souvent un squelette osseux entouré d'une carapace lipidique peu adhérente.<sup>24</sup>

Un phénomène morphologiquement intéressant, mais apparemment encore inexplicé, est l'augmentation du volume lors de la formation de lipides cadavériques, que l'on peut toujours observer expérimentalement et qui, lors de la mise en terre, a souvent pour conséquence que les corps trouvent difficilement place dans le cercueil.<sup>25</sup>

## 2.4. Résistance à la dégradation de Adipocire

Le phénomène le plus surprenant de l'adipocire est sa résistance à la dégradation. Elle serait principalement due à deux éléments : l'inhibition de la dégradation (arrêt de la putréfaction) et la difficulté d'accès au substrat pour les bactéries et les enzymes (durcissement des graisses). Mais beaucoup de choses restent floues à ce sujet. Les données relatives à la dégradation de l'adipocire semblent être encore moins bonnes. Les explications suivantes portent donc principalement sur des spéculations concernant l'inhibition du processus de putréfaction, la persistance des adipocytes et les spéculations sur leur processus de dégradation.

### 2.4.1. Inhibition du processus de putréfaction

Après la propagation des bactéries dans le corps, la putréfaction doit être considérée comme une réaction concurrente à la formation d'adipocytes. Cela est évident, car l'un des processus a un effet de dégradation et l'autre un effet de conservation. L'inhibition du processus de putréfaction est donc un processus décisif de la conservation des acides gras. Cette inhibition doit notamment empêcher que les acides gras à longue chaîne ne soient dégradés dans une plus large mesure.

Il existe des suppositions sur la cause de l'arrêt précoce de la putréfaction. COTTON rend les valeurs de pH basses, qui proviennent des acides gras, responsables de l'arrêt de la croissance bactérienne. Il cite à ce sujet des expériences de laboratoire qui se sont révélées être des processus d'autostérilisation.<sup>26</sup> MANT décrit une situation similaire :<sup>27</sup> Dans toutes les expériences où des graisses ont été introduites dans une solution, le pH a rapidement baissé à des valeurs comprises entre 4,5 et 5,5. Les solutions inoculées avec *Clostridium Welchii* (= *Cl. perfringens*) se sont révélées stériles après environ 24 heures. (Le développement de cette espèce bactérienne s'arrête à des valeurs de pH inférieures à 5.0.<sup>28</sup> ). La question est toutefois de savoir si cette observation faite en laboratoire peut être transposée à la situation dans un cadavre.

Les bactéries de putréfaction proviennent principalement du tractus intestinal et donc d'un milieu majoritairement neutre à alcalin.<sup>29</sup> Il n'est pas absurde de penser qu'une acidification aurait un effet négatif sur la "flore cadavérique". Or, la phase de putréfaction s'accompagne d'une alcalinisation qui se poursuit pendant des semaines.<sup>30</sup> Des essais sur le terrain ont permis à RODRIGUEZ/BASS de confirmer cette constatation : Ils ont constaté sous des cadavres enterrés (sans cercueil), on constate une augmentation du pH du sol de 0,5 à 2,1 unités.<sup>31</sup> Lors d'essais avec Dans le cas de chiens enterrés, il s'est avéré, comme on pouvait s'y attendre, que l'augmentation du pH résulte du stade de putréfaction, le processus de décomposition aérobie entraînant ensuite une stagnation de la valeur du pH.<sup>32</sup>

Il semble peu probable que l'adipocire soit inerte en raison de son acidité. Les bactéries acidophiles ne pourraient guère être tenues à l'écart de l'adipocire pendant des décennies. En outre, il convient de s'interroger sur la force de l'effet acide des acides gras à longue chaîne (voir à ce sujet le texte de l'annexe B "Effet acide des acides gras à longue chaîne").

**Hypothèse 1**      *La putréfaction cadavérique est inhibée par les acides gras.*

Il faut partir du principe que l'arrêt du processus de putréfaction est lié aux acides gras. Un phénomène a été décrit qui confirme ce lien

renforce : le tissu musculaire enfermé dans la carapace lipidique est conservé, alors qu'il est dégradé en dehors de l'adipocire (cf. chapitre 2.1. Mécanisme : point 8). Une première tentative d'explication de cette rupture de la putréfaction est étroitement liée au processus de durcissement des graisses. On part du principe que la précipitation des acides gras limite à elle seule leur dégradabilité au point qu'il n'y a pratiquement plus de dégradation.

L'état physique des acides gras - liquide ou solide - dépend du degré de saturation des acides gras, de la longueur de leurs chaînes et de la température du corps dans le cadavre. Ces trois facteurs sont des grandeurs dynamiques qui peuvent changer continuellement. Les acides gras initialement présents sous forme liquide correspondent, en termes de degré de saturation et de longueur de chaîne, à ceux du tissu adipeux humain de son vivant. Après leur libération du tissu adipeux, la transformation en différents produits de dégradation est ouverte, deux types de réaction apparaissant principalement avec l'hydrogénation et la  $\beta$ -oxydation (cf. fig. 2.1). Ces deux réactions ont des effets différents sur le point de fusion du mélange d'acides gras. Alors que l'hydrogénation conduit à des acides gras saturés avec des points de fusion relativement élevés, la  $\beta$ -oxydation provoque un raccourcissement de la chaîne carbonée et donc une tendance à l'abaissement du point de fusion du mélange d'acides gras.

Les taux de conversion de ces réactions dépendent de la température de différentes manières. La transformation de l'acide oléique en acide palmitique ( $\beta$ -oxydation suivie d'une hydrogénation) a lieu - dans la mesure où les enzymes correspondantes sont disponibles - même bien en dessous d'une température de 20°C.<sup>33</sup> La dépendance de la température de la  $\beta$ -oxydation des acides gras saturés à longue chaîne n'est malheureusement pas connue. La grande résistance à la dégradation de l'acide palmitique pourrait toutefois être interprétée en ce sens que cette dégradation ultérieure nécessite des températures qui n'ont pas été atteintes dans les cadavres conservés avec des acides gras ou du moins pas sur une longue période. Dans ces cas, la composition du mélange d'acides gras se déplace de plus en plus du côté des acides gras saturés à longue chaîne. Les acides gras se cristallisent, ce qui augmente encore l'inhibition de la dégradation. Avec cette tentative d'explication, la température du cadavre devient un facteur clé de la conservation des acides gras.

Pour discuter d'une deuxième tentative d'explication de la rupture de la putréfaction dans le cadavre, il convient d'apporter une version plus précise de l'hypothèse 1 :

**Hypothèse 1a**     *La putréfaction cadavérique est inhibée par les acides gras non dissociés.*

L'hydrolyse des graisses corporelles entraîne la formation d'acides gras non dissociés. Ces acides sont ensuite partiellement déprotonés : Selon SCHMIDT (1969), la proportion de sels d'acides gras dans l'adipocire s'élève à environ 10 pour cent (cf. chapitre 2.3 Composition chimique et morphologie de l'adipocire). Selon cette étude, la carapace lipidique est donc composée d'environ 90% d'acides gras non dissociés.

Un mécanisme inhibiteur important est l'effet toxique des composés. Dans des études de laboratoire, les acides gras non dissociés à chaîne courte se sont révélés être bactéricides.<sup>34</sup> La toxicité semble dépendre de la solubilité dans les lipides membranaires. En raison de leur charge, les acides gras dissociés n'ont pas accès à la membrane cellulaire. Ces conclusions ont été tirées d'études toxicologiques menées sur des échantillons de was- sions.

<sup>1</sup> Il s'agit ici des acides gras non chargés. Les acides gras déprotonés (séparation de l'atome d'eau acide) sont ensuite appelés acides gras dissociés.

acides gras solubles dans l'eau. L'acide décanoïque était le plus long des acides gras testés dans cette série d'expériences.

La toxicité en tant que mécanisme inhibiteur offre une explication acceptable de la raison pour laquelle seuls les acides gras non dissociés sont capables d'inhiber la putréfaction. En revanche, les conditions dans lesquelles les acides gras sont dissociés ne sont pas encore expliquées. Selon l'hypothèse 1a, la déprotonation des acides gras serait nécessaire pour que la décomposition du cadavre ne soit pas inhibée. Une expérience de pensée doit montrer quelle relation pourrait exister entre le processus de putréfaction et le degré de dissociation des acides gras. Au centre de ces réflexions se trouvent deux cadavres enterrés sans cercueil (cadavres 1 et 3), dont les stades de putréfaction ont été observés et décrits par RODRIGUEZ/BASS (1985) (voir à ce sujet les données de l'annexe A). L'augmentation moyenne de la température pendant la décomposition est considérée comme une mesure de l'intensité du processus de putréfaction, la différence de pH mesurée dans la terre doit donner une indication de l'alcalinité dans le <sup>corpsi</sup>.

La première étape consiste à libérer enzymatiquement des acides gras à l'état liquide dans le tissu adipeux des deux cadavres. Les acides gras non dissociés entraînent alors une diminution de l'activité bactérienne dans le tissu adipeux. Certaines enzymes bactériennes commencent à leur tour à transformer lentement l'acide oléique en acide palmitique. Avec la dissolution des éléments structurants, les acides gras liquides se diffusent partiellement dans les muscles et les organes. Voilà pour le déroulement normal, tel qu'il est considéré comme plausible.<sup>35</sup> Dans l'expérience de pensée, les chemins des corps 1 et 3 se séparent à ce stade.

Dans le cadavre 3, un processus de putréfaction intense s'est produit grâce à la température ambiante plus élevée et surtout à l'activité des insectes (augmentation moyenne de la température du corps : env. 10°C). L'alcalinité qui en résulte (différence de pH : + 2,1) se répercute sur les acides gras : Les protons sont retirés et remplacés par des cations, l'ammoniaque libérée par la dégradation des protéines se couple au groupe acide : La proportion de sels d'acides gras augmente. Plus rien ne s'oppose à une nouvelle colonisation par des bactéries. La dégradation des acides gras offre au processus de putréfaction une nouvelle source d'énergie qui favorise une décomposition finale rapide du corps. Après seulement trois mois, les tissus mous sont pratiquement entièrement dissous.

Les conditions de décomposition moins bonnes dans le cadavre 1 (pas d'activité des insectes, température initiale plus basse) ralentissent le processus de putréfaction (augmentation moyenne de la température du corps : 3,4°C). En conséquence, l'alcalinité dans le corps est plus faible (différence de pH : + 0,5). Les acides gras ne perdent que sporadiquement leurs protons acides et seule une petite quantité d'ammoniaque s'y fixe (cf. chap. 2.3. Composition chimique et morphologie des adipocires : 10 pour cent de sels acides gras). Des conditions défavorables sont offertes aux bactéries de putréfaction pour qu'elles colonisent les acides gras. Au lieu de cela, les enzymes poursuivent la transformation en acides gras saturés. Elles ne sont pas en mesure de catalyser une autre dégradation. L'état physique des acides gras passe de plus en plus de l'état liquide à l'état solide. Une carapace lipidique commence à se former et à se développer. Parallèlement, le processus de putréfaction se poursuit à l'intérieur du corps et donc la production de composés alcalins. Les acides gras continuent à être dissociés. Pour la suite, deux issues sont possibles :

1. L'adipocire en croissance limite de plus en plus l'espace d'expansion des bactéries de putréfaction et les prive ainsi de substrat.

---

<sup>i</sup> Pour être correct, il faudrait également tenir compte de la valeur pH du sol de départ et de la capacité tampon locale. Pour une approche qualitative sommaire des choses, la simplification faite doit suffire.

2. Le processus de putréfaction a un effet sur les adipocytes. Au moins sur les bords, la proportion d'acides gras dissociés augmente, ce qui permet aux bactéries de putréfaction de les coloniser et de les dégrader. Cela entraîne la consommation de protons supplémentaires et la dissociation d'autres acides gras. Petit à petit, les bactéries de putréfaction élargissent leur champ d'action et provoquent progressivement la dégradation complète des tissus mous.

L'expérience de pensée que nous venons de citer concernant l'hypothèse 1a est essentiellement d'origine spéculative et ne peut pas être laissée sans réponse. La validité de l'hypothèse 1a dépend essentiellement de l'effet toxique des acides gras à longue chaîne. Or, celle-ci doit être remise en question. Tout d'abord, il n'est pas certain que les acides gras à longue chaîne puissent être extraits de la carapace lipidique solide pour pouvoir ensuite pénétrer dans la membrane, qui doit être considérée comme liquide,<sup>36</sup>. Le passage d'un acide gras de l'adipocire à la membrane équivaut donc à un changement d'état de l'agrégat de solide à liquide, ce qui implique la dépense de l'enthalpie de fusion. Cette perte est compensée par un gain d'entropie. Le passage des acides gras dans la membrane bactérienne est toutefois douteux d'un point de vue thermodynamique.

Une autre question doit être posée concernant la toxicité. Pour la conservation des acides gras, l'effet inhibiteur et donc la toxicité des acides gras par rapport à l'ensemble de la "flore cadavérique" doivent être valables. Une telle généralisation des expériences toxicologiques en laboratoire est dangereuse. Comme les effets toxiques concernent la membrane, il faut notamment tenir compte du fait que la structure de la paroi cellulaire varie selon les espèces bactériennes.<sup>37</sup>

#### **2.4.2. Persistance de Adipocire**

Une propriété importante pour la biodisponibilité et donc la biodégradabilité d'une substance est sa solubilité dans l'eau. Il n'en sera pas autrement dans le cas de la décomposition des cadavres. Les composés dissous dans l'eau sont librement accessibles aux bactéries et aux enzymes de tous côtés. Pour les composés adsorbés sur des corps solides ou associés dans une phase hydrophobe, l'accès est plus difficile, parfois impossible, en particulier pour les enzymes.

Les acides gras à longue chaîne sont pratiquement insolubles dans l'eau.<sup>38</sup> Ils forment leur propre phase apolaire. En revanche, les bactéries ne peuvent pas ou mal se développer dans une solution lipidique. Il est possible que la double couche lipidique de la membrane y soit altérée. De plus, dans le milieu apolaire, l'eau ne devrait pas être présente en quantité suffisante.

sont disponibles. La plupart des bactéries ont besoin d'une activité aquatique de plus de 0.98.<sup>39</sup> Si aucune colonisation n'est possible dans le substrat à dégrader, le processus de décomposition se limite aux interfaces communes avec des solutions aqueuses.

La résistance des lipides cadavériques permet de conclure qu'il n'y a pas ou très peu de bioactivité au sein de l'adipocire. Différentes causes sont envisageables :

1. Les bactéries ne parviennent pas à coloniser la carapace lipidique. Trois raisons peuvent être invoquées :



- Le manque d'eau a déjà été abordé plus haut dans cette section. Il reste à déterminer si l'eau stockée dans l'adipocire est suffisante pour permettre la croissance des bactéries.
  - Des effets toxiques pourraient agir comme inhibiteurs de la dégradation de l'adipocire. La toxicité des acides gras a été brièvement abordée dans le cadre de l'hypo- thèse 1a discutée ci-dessus.
  - La précipitation des acides gras crée un obstacle physique à l'accès.
2. La dégradation de la carapace lipidique solide ne se fait qu'en aérobiose. Dans ce cas, le taux de dégradation de l'adipocire serait déterminé par l'apport d'oxygène. Après le ramollissement des adipocytes, la dégradation anaérobie doit également être à nouveau prise en considération. On peut s'y attendre, car dans le processus de décomposition non perturbé, les acides gras liquides sont dégradés en anaérobiose par  $\beta$ -oxydation.<sup>40</sup>

Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer à quelles causes est due la faible bioactivité dans la carapace lipidique. Pour répondre à cette question, il faudrait procéder à des clarifications expérimentales ciblées. On peut toutefois supposer que ces deux points contribuent à la persistance de l'adipocire.

Un processus possible qui pourrait encore renforcer la persistance de l'adipocire est la précipitation de calcaire à la surface conservée par les acides gras. La condition préalable est toutefois que de l'eau calcaire provenant des zones de sol environnantes s'écoule vers le cadavre. Le milieu alka- lique qui se forme pendant le processus de putréfaction peut entraîner une précipitation du calcaire. Une croûte calcaire se forme à la surface du cadavre, ce qui a des effets négatifs sur l'apport d'oxygène (cf. cause 2 ci-dessus) et constitue une barrière physique pour les bactéries (cf. troisième raison de la cause 1). Lors d'exhumations, on a déjà pu observer des dépôts de calcaire dans l'adipocire.<sup>41</sup>

### 2.4.3. Réduction de Adipocire

Si la colonisation bactérienne se limitait à la surface de l'adipocire, il se pourrait que sa décomposition ne se fasse que superficiellement. Une décomposition qui progresse lentement en profondeur, couche par couche, expliquerait en partie le faible taux de décomposition. S'il s'avérait en outre que la dégradation de la carapace lipidique solide ne s'effectue qu'en aérobiose (cf. chapitre 2.4.2, point 2), ce serait un grand pas vers l'interprétation de la lenteur de la dissolution des adipocytes. Il faut toutefois souligner que tant la dégradation en nappe que la dégradation aérobie obligatoire sont purement spéculatives et sans corroboration empirique. On peut toutefois s'attendre à ce que la dégradation des lipides cadavériques soit au moins accélérée par l'oxygène.

Dans la littérature consultée, seul un article a donné une indication sur la morphologie de la dégradation de l'adipocire. EVANS (1963)<sup>42</sup> a découvert dans une série d'exhumations sept cadavres dont l'adipocire présentait une dégradation partielle. Par-dessus la carapace lipidique par ailleurs solide, il a trouvé des zones brunes molles, parfois même liquides, réparties au hasard sur la tête, le tronc et les membres. Les linceuls de ces sept morts étaient tous humides, alors que ceux des adipocires intacts étaient secs. Dans deux cercueils, Evans a également trouvé un peu d'une solution brune et épaisse.<sup>43</sup>

La perte de fermeté qui accompagne la dégradation indique qu'il ne devrait plus s'agir d'un processus de dégradation lent et superficiel, du moins à un stade ultérieur de la dégradation. Il semblerait qu'aux endroits où l'adipocire se ramollit, ce ramollissement se produise à une vitesse relativement élevée et en profondeur. Il est également possible que ce processus de dégradation s'étende latéralement, qu'il touche ainsi l'ensemble de la carapace lipidique et qu'il puisse être mené à son terme dans un laps de temps prévisible, peut-être en quelques années. Le fait que - semble-t-il - l'adipocire en décomposition n'est que très rarement découvert et décrit plaide en ce sens. Evans a été la seule source à faire état d'une telle expérience.

## 2.5. Facteurs influençant la formation d'adipocytes

Il ne suffit pas de savoir comment l'adipocire est composé chimiquement et selon quels schémas de réaction il est formé. Les conditions qui permettent la conservation de l'acide gras sont d'une importance décisive pour la pratique funéraire. Il s'agit généralement de conditions qui ont un effet inhibiteur sur le processus de putréfaction, mais qui ne l'empêchent pas.

La présence simultanée de tissus adipeux de stockage, de bactéries et d'eau est considérée comme une condition préalable à la formation d'adipocytes :

- Les acides gras constituent le substrat de base. Une importance particulière doit être accordée au *tissu adipeux de stockage subcutané*, qui semble être à l'origine de la conservation des acides gras.
- Les *bactéries* produisent différentes enzymes qui contribuent à la libération et à la transformation des acides gras. C'est surtout dans le tractus intestinal que le corps dispose d'un énorme dépôt de micro-organismes. Les enzymes de *Clostridium perfringens* semblent être particulièrement importantes pour la saturation des acides gras.
- L'eau a un caractère essentiel pour toute activité bactérienne et enzymatique.<sup>44</sup> Pour la formation d'adipocytes, des quantités suffisantes sont normalement stockées dans le tissu adipeux.<sup>45</sup> Cela va à l'encontre de la croyance qui a prévalu pendant des décennies.

L'opinion selon laquelle de grandes quantités d'eau supplémentaires étaient nécessaires pour la conservation des acides gras était erronée. Ce jugement erroné est né des nombreuses observations de corps aquatiques et de corps provenant de tombes humides. MANT a été le premier à reconnaître que la formation d'adipocire ne se produit pas exclusivement dans un environnement humide. Lors de différentes exhumations, il a constaté que la formation d'adipocire était déjà en partie due au liquide corporel : les graisses corporelles absorbent l'eau des tissus internes, qui peuvent à leur tour se momifier.<sup>46</sup>

Il existe en outre différents facteurs d'influence qui favorisent ou au contraire nuisent à la formation d'adipocytes. La littérature a fourni quelques indications à ce sujet. A l'aide de descriptions d'expériences concrètes d'exhumations et de réflexions personnelles, un puzzle complet de facteurs a été constitué, qui est reproduit ci-dessous.

### 2.5.1. Oxygène

Lors de la recherche des causes des troubles de la décomposition, l'attention se porte souvent sur l'oxygène. On sait que son absence peut entraîner une décomposition fortement inhibée et incomplète des substances organiques. Des essais en laboratoire ont permis de constater que le taux de formation d'adipocire est environ 20 pour cent plus élevé dans des conditions anaérobies que dans des conditions aérobies.<sup>47</sup> Pour interpréter ce résultat, il faut tout d'abord constater qu'en conditions aérobies, la formation de lipides cadavériques est toujours abondante. Il convient ensuite d'émettre une objection : Pendant la première période de formation de l'adipocire, un processus de décomposition *anaérobie* se déroule avec la putréfaction. Même si de l'oxygène est présent dans le cercueil, il ne faut pas s'attendre à ce que cela change quoi que ce soit à l'anaérobiose dans le corps. Des images de parties du corps gonflées pendant la phase de décomposition laissent deviner que la peau constitue une forte barrière d'échange gazeux. L'oxygène, et avec lui la dégradation aérobie, ne prend le dessus qu'au moment de la déshydratation du corps, donc à un moment où les acides gras à longue chaîne devraient être dégradés en acides gras à courte chaîne.<sup>48</sup> La position de COTTON, qui ne s'attend pas à ce que l'accès de l'oxygène au corps enterré ait un effet sur la production d'adipocytes,<sup>49</sup> n'est donc pas absurde.

### 2.5.2. Température du corps

En ce qui concerne les processus de décomposition, la température fait partie des facteurs écologiques abiotiques extrêmement importants. Ce n'est pas pour rien que le réfrigérateur et le congélateur font partie des stratégies essentielles de conservation des aliments dans la cuisine moderne. Dans le cadavre, la température de réaction des processus biochimiques correspond précisément à la température du corps. Elle est donc particulièrement importante pour le processus de décomposition.

**Hypothèse**            *2Après la propagation des bactéries dans le corps, les basses températures corporelles ont un effet favorisant l'adipocire.*

L'activité des bactéries dépend de manière caractéristique de la température (voir figure 2.3). Il existe une valeur maximale et une valeur minimale de température, au-delà desquelles la croissance bactérienne est stoppée. Le taux de croissance le plus élevé se situe à proximité de la température maximale, à laquelle une multiplication de la population est encore possible. En dessous de la température optimale et jusqu'à la température minimale, le taux de croissance suit l'équation d'Arrhenius. Celle-ci exprime essentiellement le fait que le logarithme du taux de croissance  $k$  dépend linéairement de l'inverse négatif de la température :

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT}$$

$A$  (facteur de fréquence),  $E_A$  (énergie d'activation) et  $R$  (constante universelle des gaz) sont des valeurs qui n'ont pas d'importance dans cette considération.

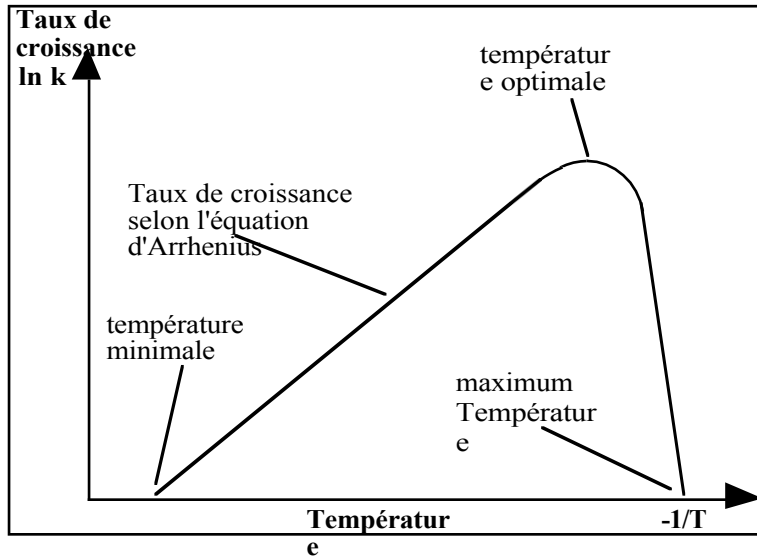


Fig. 2.3 : Effets de la température sur le taux de croissance des microorganismes et de leurs enzymes. Selon ZEYER (1994)

La putréfaction fait intervenir sur de longues distances des bactéries intestinales mésophiles dont l'optimum de croissance devrait se situer autour de 40°C (p. ex. *Escherichia coli* : à 39°C)<sup>50</sup>. La température corporelle minimale où la "flore cadavérique" est encore active s'étend jusqu'à moins de 5°C. C'est pourquoi, en cas de longue période de mise en bière, le processus de putréfaction s'enclenche malgré la glacière. Les espèces bactériennes actives seront toutefois limitées à ces températures. Pour *Clostridium perfringens* par exemple, la croissance s'arrête déjà dans la plage de température

de 15 à 20°C s'arrête.<sup>51</sup> La composition des espèces va se modifier en faveur des espèces adaptées aux basses températures.

Les bactéries mieux adaptées à la température se déplacent.

Comme la décomposition des triglycérides et le durcissement des graisses sont des processus lents, le facteur temps est important pour la conservation des acides gras.<sup>52</sup> Un processus de putréfaction atténué offre aux enzymes de transformation des graisses suffisamment de temps pour former une carapace lipidique. Bien entendu, les taux de réaction dépendent ici aussi de la température selon l'équation d'Arrhenius. Mais contrairement à de nombreuses bactéries de putréfaction, les enzymes de transformation des graisses restent actives même à des températures très basses.<sup>53</sup> Il en résulte un avantage pour la conservation des acides gras à basse température.

### 2.5.3. Transport de chaleur

Le processus de putréfaction libère de la chaleur, ce qui permet à la putréfaction de fonctionner dans une certaine mesure comme un processus auto-accélérateur. Il n'y a pas de processus auto-accélérateur lorsque le flux de chaleur compense ou dépasse la production de chaleur. Dans ce cas, la putréfaction reste à un niveau d'activité relativement faible.

Le transport de chaleur dans le sol comprend trois composantes : la conduction thermique (conduction), la diffusion de vapeur d'eau (flux de chaleur latente) et l'infiltration d'eau froide ou chaude. Cette dernière semble peu pertinente dans le cadre de la thématique considérée, raison pour laquelle nous renonçons à fournir des explications supplémentaires à ce sujet.

#### 2.5.3.1. Conduction de la chaleur (conduction)

gras

La conduction thermique décrit un transfert d'énergie cinétique par diffusion de la région chaude vers la région froide. La "force motrice" de la conduction thermique est la température.

gradient de température ( $dT/dz$ ). La densité du flux de chaleur dépend également de la conductivité thermique ( $K$ ) du matériau. Exprimée dans une formule, cela donne la densité de flux de chaleur ( $G$ ) suivante :<sup>54</sup>

$$G = -K \cdot \frac{dT}{dz} \quad \text{Loi de Fourier}$$

Le gradient de température dépend essentiellement de la température ambiante. Dans le sol, l'évolution de la température présente une courbe annuelle plus ou moins sinusoïdale. Dans le climat du Plateau suisse, cette courbe annuelle devrait osciller autour d'une température moyenne de 7°C, l'amplitude de l'oscillation sinusoïdale diminuant avec la profondeur du sol (cf. chap. 3.1. Température du sol).

La conductivité thermique du sol dépend fortement de sa teneur en eau, de sa composition et de sa structure. L'air étant un mauvais conducteur de chaleur, la conduction thermique se fait pratiquement uniquement par les phases solide et liquide du sol. Dans les sols presque secs, la conduction se limite donc en grande partie aux points de contact entre les particules solides de la matrice du sol. Dans les sols fortement déshydratés, même de faibles variations de la teneur en eau entraînent des pertes d'eau.

Les variations de température entraînent une augmentation considérable de la section de conduction thermique.<sup>55</sup> Une liste des constantes de conductivité thermique de quelques éléments importants du sol est présentée dans le tableau 2.4.

	Conductivité thermique (J m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
Quartz	8.8
Minéraux d'argile	3.0
org. Matériel	0.25
Eau	0.6
Glace (à 0°C)	2.2
Air	0.03

Tab. 2.4 : la conductivité thermique  $K$  verte de différents composants du sol à 10°C. Légèrement modifié d'après GISI (1990) : p. 79

Le corps à l'intérieur d'un cercueil intact est en grande partie entouré d'air thermiquement isolant. Lorsqu'il n'est pas détrempé, le bois a également un effet isolant thermique relativement bon. Le corps enterré dans un cercueil et dans une terre relativement sèche ne génère donc qu'un faible flux de chaleur par conduction. La conduction thermique devient plus importante lorsque le cercueil se remplit d'eau externe ou de liquide mortuaire ("effet baignoire") ou lorsque l'inhumation a lieu dans un sol humide sans cercueil. Dans le cas de "l'effet baignoire", la conductivité thermique de l'eau peut être considérée comme une composante déterminante du transport de chaleur. Ce cas est comparable, à distance, aux corps immergés dans des lacs dont l'émergence a été empêchée mécaniquement. La formation d'adipocire chez de tels cadavres a été décrite à plusieurs reprises dans des revues médico-légales (p. ex. Cotton, 1987). Selon BERG, les inhumations dans des sols argileux et limoneux peu perméables à l'eau offrent souvent une conservation encore plus complète que celle obtenue par de l'eau.<sup>56</sup>

Dans le cas des corps enterrés sans cercueil, le corps est en contact avec des particules organiques et inorganiques du sol, de l'eau et de l'air. Pour un sol humide, on peut s'attendre à une conductivité thermique qui dépasse encore celle de l'eau. Il en résulterait une densité accrue du flux de chaleur et une température corporelle post-mortem plus basse. Avec l'hypothèse 2, cela pourrait être mis en accord avec une observation de MANT, qui a vu la décomposition des corps nettement accélérée par les cercueils lors d'exhumations dans des champs de tombes de la Seconde Guerre mondiale.<sup>57</sup> Il convient toutefois de noter que les

Conservation des acides

---

gras

cercueils utilisés à l'époque étaient de fabrication simple et fermaient mal.

Dans les sols humides de la zone climatique tempérée, l'observation de Mant peut être en partie correcte. Pour tirer des conclusions générales, la diversité des facteurs de la décomposition des cadavres (morphologie, climat, type de sol, température du sol, profondeur d'inhumation, activité des insectes, état du cercueil et habillement du cadavre) exige des approches plus différenciées.

### 2.5.3.2. Diffusion de vapeur d'eau (flux de chaleur latent )

Outre la conduction, un flux de chaleur latent peut également se produire lors de l'inhumation sans cercueil par diffusion de vapeur d'eau. L'eau s'évapore du côté chaud (p. ex. film d'eau à la surface du corps avec un espace d'air adjacent) et se condense du côté froid.<sup>58</sup> L'énergie thermique transportée correspond à l'énergie d'évaporation. La signification possible du flux de chaleur latente est expliquée ci-après à l'aide des observations d'EVANS (1963) :<sup>59</sup>

Evans a exhumé 59 corps vêtus de linceuls, qui ont été enterrés pendant 103 à 127 ans dans un cercueil à trois compartiments, dans des caveaux relativement secs. Les cercueils étaient composés d'une enveloppe en bois à l'extérieur et à l'intérieur, et d'une capsule en plomb au centre. Dans le caveau, les cercueils étaient entourés d'une fine couche de terre. La température ambiante dans les caveaux était d'environ 4,4°C, sans variations saisonnières significatives. Sur les 59 corps, 33 étaient conservés avec des acides gras, ce qui représente un pourcentage de 56%. C'est l'un des rares rapports où la conservation d'acides gras est décrite dans un environnement sec. La question de la cause se pose. Deux éléments sont frappants : la structure du cercueil et la température ambiante constamment basse.

La construction mentionnée du triple cerclage, mais aussi d'un lourd cerclage en chêne, réduit drastiquement les échanges gazeux avec l'environnement. L'expérience suivante permet d'évaluer les conséquences possibles :

Avec le processus de putréfaction, le réchauffement du corps et la libération de liquide cadavérique, l'humidité de l'air dans l'espace du cercueil augmente jusqu'à la limite de saturation. Les couches d'air en contact avec les parois froides du cercueil se refroidissent, ce qui entraîne la condensation de la vapeur d'eau. L'eau de condensation s'accumule et goutte en direction du fond du cercueil. Le linceul est humidifié par l'eau de condensation (du plafond ou du sol) ou directement par le corps. L'eau des vêtements imbibés de liquide s'évapore, ce qui entraîne un transfert d'énergie qui s'éloigne du corps. L'énergie d'évaporation est transmise à la paroi froide du cercueil, d'où elle est diffusée vers l'extérieur en fonction du gradient de température. Il en résulte un transfert net d'énergie du corps vers l'environnement.

**Hypothèse 3** *Si l'on empêche la déshydratation et la dessiccation du cadavre pendant le processus de putréfaction, le risque de conservation des acides gras augmente dans une mesure considérable.*

Les cercueils lourds en bois, en métal ou en pierre, qui doivent être considérés comme pratiquement hermétiques à l'eau et à la vapeur d'eau, ont depuis longtemps la réputation de contribuer à la conservation des acides gras.<sup>60</sup> Il en va de même pour les enterrements de cercueils dans un substrat riche en argile. Ces sols se caractérisent par une très bonne capacité de rétention d'eau, c'est pourquoi ils sont fortement



ont tendance à s'humidifier. C'est pourquoi, en cas d'inhumation dans une terre détrempée, le liquide de putréfaction s'accumule dans la fosse du cercueil.

L'une des fonctions les plus importantes du processus de putréfaction est le drainage du corps. C'est précisément ce processus que les types de cercueils et de sols mentionnés perturbent massivement. Trois effets sont à prendre en compte :

- Le premier concerne le flux de chaleur latente mentionné, l'eau servant de moyen de transport de l'énergie. L'effet rafraîchissant de la diffusion de vapeur d'eau peut être ressenti par tout un chacun, par exemple en ne se séchant pas immédiatement après un bain de douche. Pour la conservation des acides gras, le flux de chaleur latente doit probablement être considéré comme un facteur favorisant fortement la conservation. Cette estimation peut être tirée des nombreuses observations selon lesquelles les vêtements entraînent une augmentation massive de la formation d'adipocire.<sup>61</sup> L'effet des vêtements est probablement dû au fait qu'ils sont trempés et que ce film d'humidité constant qui se forme à la surface du corps entraîne une évaporation continue et donc un retrait constant de chaleur. MANT attribue toutefois l'effet des vêtements à la protection contre les insectes, en plus de la rétention d'humidité, et<sup>62</sup> BERG à une réduction de l'entrée d'air.<sup>63</sup>
- Outre le flux de chaleur latente, une accumulation de liquide sur le fond du cercueil entraîne également une conduction thermique par conduction (voir ci-dessus).
- Les cercueils du type décrit et les sols humides retiennent le liquide corporel dans l'espace du cercueil. La chaleur libérée se répartit ainsi entre autres sur une quantité d'eau relativement importante - l'eau étant connue pour avoir une grande capacité thermique. On ne sait pas si cet effet a des répercussions. Il convient toutefois de rappeler qu'environ 80 % du corps est constitué d'eau.<sup>64</sup> Cela correspond en moyenne à environ 60 litres d'eau qui doivent être chauffés en plus par le processus de putréfaction.

Ces éléments entraînent une baisse de la température corporelle et donc un affaiblissement du processus de putréfaction, qui peut être plus facilement stoppé par la progression de l'adipocire. C'est ainsi que l'on peut expliquer l'apparition de cadavres conservés par des acides gras.

#### **2.5.4. Diversité bactérienne**

Au cours d'un processus de dégradation, la composition du substrat change naturellement. En raison des différentes compétences de dégradation des différentes espèces de bactéries, on pourrait s'attendre à ce que la modification du milieu de culture s'accompagne d'une succession de bactéries. Dans la pratique - c'est-à-dire sur le cadavre - aucune étude approfondie n'a été menée à ce sujet. Il semble toutefois que des changements se produisent chez les microorganismes dominants, du moins au cours des stades ultérieurs de la putréfaction.<sup>65</sup>

Pour une décomposition rapide, il faut s'attendre à la nécessité d'une certaine diversité d'espèces dans la bactériologie de décomposition. Il convient de se demander si une faible activité de putréfaction peut avoir un effet négatif sur cette biodiversité. Une expérience de pensée doit montrer grossièrement quelles relations pourraient exister à cet égard : Le taux de croissance des bactéries suit l'équation d'Arrhenius dans certaines limites (cf. chap. 2.5.2. Température du corps). A la limite inférieure de cette plage de température, les possibilités de développement divergent.

Les bactéries sont souvent plus nombreuses que les autres, ce qui peut conduire à l'éviction de certains types de microorganismes. Si un spectre bactérien unilatéral devait se développer de cette manière, il pourrait en résulter une perte d'efficacité de la dégradation. En ce qui concerne les bactéries de putréfaction, de nombreuses questions doivent encore être résolues.

Il faut faire l'objection suivante à l'expérience de pensée ci-dessus : Si les températures ambiantes devaient effectivement perturber le processus de putréfaction de la manière décrite, les cimetières situés dans des régions montagneuses devraient être particulièrement exposés au "risque d'adipocire", ce qui n'est pas le cas dans cette mesure.<sup>66</sup> Les liens évoqués doivent donc être considérés comme peu probables. Les basses températures ambiantes sont toutefois importantes pour la conservation des acides gras, car elles peuvent provoquer une grande chute de température, ce qui augmente le flux de chaleur par conduction (cf. chapitre 2.5.3.1. Conduction de la chaleur).

### 2.5.5. Richesse de la graisse et Répartition de la graisse

Dans des conditions environnementales favorables à la décomposition, l'obésité favorise le processus de putréfaction dans le corps. L'effet d'isolation thermique du tissu adipeux et le contenu énergétique chimique des acides gras entraînent des températures corporelles post-mortem élevées et accélèrent ainsi le processus de dégradation. En revanche, lorsque les conditions de décomposition sont défavorables, la richesse en graisse doit être considérée comme un grand réservoir de substrats pour la formation d'adipocytes et, par conséquent, comme un facteur favorisant la conservation des acides gras.<sup>67</sup> Aucune étude n'a cependant été réalisée sur l'ampleur de cet effet favorable.

Il est possible d'obtenir des informations plus détaillées sur l'influence de la répartition de la graisse corporelle. Selon deux études, dans lesquelles les cadavres ont été analysés séparément pour chaque sexe, la formation d'adipocytes est significativement plus fréquente chez les femmes. Dans un rapport de la commission néerlandaise sur la décomposition incomplète des corps dans les cimetières, il est fait état d'un nombre trois fois plus élevé de cas d'adipocire chez les cadavres de femmes que chez les hommes.<sup>68</sup> EVANS confirme cette tendance : Lors d'une série d'exhumations, il a constaté la formation d'adipocire chez 62% des femmes, alors que le pourcentage des hommes n'était que de 45%.<sup>69</sup> On peut supposer que cette tendance inégale aux troubles de la décomposition selon le sexe trouve son origine dans la répartition différente du tissu adipeux de stockage.

Le tissu adipeux de stockage se trouve principalement dans le tissu adipeux sous-cutané, rétropéritonéal (situé derrière le péritoine) et entre les muscles et leurs fibres.<sup>70</sup> En ce qui concerne la répartition des graisses corporelles en fonction du sexe, la nomenclature est intéressante en cas de corpulence : chez les personnes en surpoids, on distingue la répartition androïde et gynoïde des graisses. La graisse de type androïde s'accumule en grande quantité dans la région rétropéritonéale, un phénomène que l'on observe plus fréquemment chez les hommes. Le type gynoïde, quant à lui, ressemble à la forme féminine : Le tissu adipeux est mieux réparti sur le corps (tissu adipeux sous-cutané), avec une accentuation caractéristique des hanches.<sup>71</sup>

Il semble donc qu'il y ait un lien entre la quantité de graisse sous-cutanée et la tendance à la formation d'adipocytes. Cela n'a rien d'étonnant. Le tissu adipeux sous-cutané occupe déjà une position particulière dans la formation du lipide cadavérique. Selon BERG, le processus de durcissement des graisses dans le corps progresse de l'extérieur vers l'intérieur.<sup>72</sup> Comme l'adipocire a besoin de graisse corporelle comme substrat de départ, le terme "extérieur" ne peut désigner que le tissu adipeux sous-cutané.

### 2.5.6. Matériel végétal

Dans plusieurs tombes où le fond du cercueil a été garni de matériel végétal, on a constaté une moindre tendance à la conservation des acides gras. Le matériel végétal est donc présenté par différents auteurs comme favorisant le processus de putréfaction ou nuisant à la formation d'adipocire.<sup>73</sup> MANT attribue cet effet en particulier à la paille et, dans une moindre mesure, aux copeaux de bois. Il attribue la décomposition accélérée à l'effet d'isolation thermique et à la chaleur libérée lors de la dégradation de la matière végétale.<sup>74</sup>

## Questions ouvertes

*Pour stopper le processus de putréfaction*

- Qu'est-ce qui stoppe le processus de putréfaction lors de la conservation des acides gras ?

*Sur l'évolution de la température dans un corps*

- A quelles températures faut-il s'attendre pendant la phase de décomposition intensive d'un corps enterré ?
- Quelles sont les températures corporelles maximales atteintes dans les cadavres soumis par la suite à la conservation des acides gras ?

*Vers les acides gras à longue chaîne*

- Dans quelles conditions se produit une dégradation anaérobie des acides gras à longue chaîne ?
- Quelles bactéries sont capables de dégrader les acides gras à longue chaîne (en particulier l'acide palmitique) ?
- Dans quelle plage de température se situe leur activité optimale ?
- En dessous de quelle température la dégradation des acides gras à longue chaîne est-elle pratiquement négligeable ?

*Vers l'Adipocire*

- Quels sont les facteurs qui expliquent la faible dégradabilité de l'adipocire ?
- Le degré de dissociation des acides gras a-t-il une incidence sur la dégradabilité des adipocires ?
- Comment s'effectue la dégradation de l'adipocire ? Qu'est-ce qui provoque cette dégradation ?

---

<sup>1</sup>Rubner (1912) : p. 186

<sup>2</sup>diverses communications orales

<sup>3</sup>Berg (1975) : p. 93

<sup>4</sup>Berg (1975) : p. 89

<sup>5</sup>Cotton (1987) : p. 1129

<sup>6</sup>Berg (1975) : p. 88

<sup>7</sup>Berg (1975) : p. 89 s.

<sup>8</sup>Cotton (1987) : p. 1129

<sup>9</sup>cf. Janaway (1987) : p. 132

- <sup>10</sup>Berg (1975) : p. 92  
<sup>11</sup>Berg (1975) : p. 92  
<sup>12</sup>cf. Takatori (1987)  
<sup>13</sup>Takatori (1986)  
<sup>14</sup>cf. Takatori (1987)  
<sup>15</sup>loc. cit.  
<sup>16</sup>loc. cit.  
<sup>17</sup>Schmidt (1969) : p. 219 et suivantes.  
<sup>18</sup>loc. cit.  
<sup>19</sup>Schmidt (1969) : p. 193  
<sup>20</sup>Berg (1975) : p. 91  
<sup>21</sup>Berg (1975) : p. 89  
<sup>22</sup>Berg (1975) : p. 88  
<sup>23</sup>Berg (1975) : p. 89  
<sup>24</sup>Berg (1975) : p. 90  
<sup>25</sup>loc. cit.  
<sup>26</sup>Cotton (1987) : p. 1129  
<sup>27</sup>Mant (1987) : p. 77  
<sup>28</sup>Wallhäusser (1978) : p. 441  
<sup>29</sup>cf. Brock (1991) : p. 392 et suivantes.  
<sup>30</sup>Schmidt (1969) : p. 209  
<sup>31</sup>Rodriguez/Bass (1985) : p. 850  
<sup>32</sup>loc. cit.  
<sup>33</sup>Cotton (1987) : p. 1129  
<sup>34</sup>Bajpai/Iannotti (1988) : p. 213  
<sup>35</sup>voir par exemple Berg (1975)  
<sup>36</sup>cf. Schlegel (1992) : p. 44  
<sup>37</sup>voir Schlegel (1992) : p. 53 et suivantes. Il convient d'attirer spécialement l'attention sur la structure différente des membranes chez les bactéries à Gram positif et à Gram négatif.  
<sup>38</sup>cf. The Merck Index, 11e éd., 1989  
<sup>39</sup>Schlegel (1992) : p. 197  
<sup>40</sup>Selon la communication orale de Monsieur Angst (EAWAG, Dübendorf), la  $\beta$ -oxydation peut se dérouler aussi bien en aérobie qu'en anaérobie.  
<sup>41</sup>Tony Linder (fondateur de Tony Linder & Partner AG, Altdorf ; une entreprise spécialisée dans la rénovation de cimetières) a confirmé avoir fait de telles observations.  
<sup>42</sup>nous reviendrons plus loin sur les conditions d'inhumation et d'environnement.  
<sup>43</sup>Evans (1963) : p. 147  
<sup>44</sup>Mant (1987) : p. 76  
<sup>45</sup>Janaway (1987) : p. 132  
<sup>46</sup>Mant (1987) : p. 76. Mant a publié cette conclusion dès 1950.  
<sup>47</sup>Mant (1987) : p. 77  
<sup>48</sup>cf. Berg (1975) : p. 71  
<sup>49</sup>Cotton (1987) : p. 1129  
<sup>50</sup>Zeyer (1994) : Feuilles d'accompagnement p. 12  
<sup>51</sup>Wallhäusser (1978) : p. 441  
<sup>52</sup>Berg (1975) : p. 71 resp. 92  
<sup>53</sup>Mant (1987) : p. 76  
<sup>54</sup>Flühler (1991) : p. 5-15 s.  
<sup>55</sup>voir Flühler (1991) : p. 5-21  
<sup>56</sup>Berg (1975) : p. 89  
<sup>57</sup>Mant (1987) : p. 68.  
<sup>58</sup>Flühler (1991) : voir chapitre 5  
<sup>59</sup>Evans (1963)  
<sup>60</sup>voir par exemple Rubner (1912) : p. 185, mais aussi des communications orales.  
<sup>61</sup>entre autres chez Cotton (1987) : p. 1129, Mant (1987) : p. 68, Berg (1975) : p. 89, Mellen (1993)  
<sup>62</sup>Mant (1987) : p. 69

<sup>63</sup>Berg (1975) : p. 89

<sup>64</sup>Le poids sec d'une personne est estimé à environ 14 kg (Berg, 1975 : p. 88).

<sup>65</sup>Berg (1975) : p. 68

<sup>66</sup>consultation orale avec M. Äschlimann, Tony Linder & Partner AG, Altdorf

<sup>67</sup>Cotton (1987) : p. 1129

<sup>68</sup>Berg (1975) : p. 89

<sup>69</sup>Evans (1963) : p. 148

<sup>70</sup>Gerlach (1989) : p. 124

<sup>71</sup>Gerlach (1989) : p. 125

<sup>72</sup>Berg (1987) : p. 89

<sup>73</sup>Cotton (1987) ; Mant (1987) ; Henderson (1987)

<sup>74</sup>Mant (1987) : p. 71

### 3. INTERACTIONS ENTRE LE SOL ET DÉCOMPOSITION DU CADAVRE

#### Résumé

Dans la sépulture en terre, les conditions de décomposition des corps sont essentiellement déterminées par le sol. En particulier, le drainage du corps, dont l'importance pour le processus de décomposition a été démontrée dans les chapitres précédents, peut être entravé par la présence d'eau libre dans le sol (eau souterraine ou eau de barrage). Une couche de sol suffisamment épaisse et perméable à l'eau, depuis le fond de la tombe jusqu'à la nappe phréatique, offre donc des conditions favorables à une bonne décomposition.

L'infiltration en profondeur se fait principalement dans les pores grossiers du sol, qui sont drainés en deux jours environ après de fortes pluies. La proportion de pores grossiers augmente dans le sol avec l'augmentation de la teneur en matériaux terreux à gros grains et la diminution de la densité de la couche. En revanche, les sols très argileux ont tendance à former des retenues d'eau, raison pour laquelle ils ne sont pas adaptés aux cimetières.

L'aération du sol est également liée de manière déterminante aux pores grossiers, par exemple parce que l'air frais de l'atmosphère pénètre dans le sol après leur drainage. Les besoins en oxygène pendant la phase de décomposition devraient toutefois être couverts même si l'aération du sol est faible.

L'impact de l'activité funéraire sur le sol a été l'un des points forts de l'étude. L'activité funéraire implique principalement deux interventions dans le sol : le creusement et le remblayage de la tombe ainsi que l'apport de matière organique dans le sous-sol minéral. Les effets sur le sol qui en résultent intéressent au préalable la question de savoir si une détérioration de la conductivité de l'eau peut se produire sous le fond de la tombe. Les processus de formation de la couche d'accumulation pris en considération sont les actions mécaniques et différents processus de stockage. La validité de ces processus doit cependant être remise en question dans le contexte considéré, d'autant plus que la littérature ne contient aucune indication valable sur des modifications du sol à ce sujet et que les archéologues (et anthropologues) contactés n'ont pas fait état de telles observations. Lors de nos propres études de terrain dans le cimetière de Zurich-Affoltern, qui est aménagé sur un sol bien perméable, nous n'avons pas non plus trouvé de signes de formation de couches d'accumulation. En cas de troubles de la décomposition dans les cimetières, il faut donc généralement partir du principe que le sol était déjà impropre à la décomposition des corps au début de l'activité d'inhumation, même si, en l'état actuel des informations, une détérioration de la qualité de la décomposition avec le nombre d'occupants ne peut pas non plus être exclue.

En général, on s'attend à ce que le squelette d'un corps soit complètement squelettisé à l'issue du repos funéraire. La réalisation de cette attente dépend en grande partie des conditions du sol. Les chapitres précédents ont mis en évidence trois facteurs qui peuvent avoir une forte influence sur le processus de décomposition : la température du cadavre, le transport de chaleur (pendant la phase de décomposition intense) et l'apport d'oxygène (pendant la décomposition aérobie). La chaleur corporelle est liée à la température du sol, tandis que le transport de chaleur et l'apport d'oxygène dépendent du régime hydrique du sol.

### 3.1. Température du sol

A l'exception de la phase de putréfaction intense, la température du corps d'un cadavre est principalement déterminée par la température du sol (cf. chapitre 1). L'activité de décomposition bactérienne et enzymatique dépend à son tour de la température du corps (cf. fig. 2.3). On peut donc supposer qu'il existe une relation directe entre la température du sol et la vitesse de décomposition. Sur une base annuelle, la température du sol présente un cycle plus ou moins sinusoïdal qui, sous notre climat, oscille autour d'une température moyenne d'environ 7°C. C'est ce qui ressort des mesures effectuées dans le profil "Oberer Rickenzopfen, Langenthal".<sup>1</sup> L'amplitude de l'oscillation sinusoïdale diminue avec la profondeur du sol et les points de culmination apparaissent plus tard. Dans les grandes profondeurs de sol, les températures du sol se stabilisent donc à un niveau bas et constant (cf. tab. 3.1).

La température moyenne annuelle reste à peu près la même à différentes profondeurs de sol. Mais il est faux de conclure que la profondeur du sol n'a pas d'influence sur le taux de décomposition. Ce serait le cas s'il existait une relation linéaire entre le taux de décomposition et la température corporelle. En réalité, il s'agit d'une relation exponentielle (voir figure 2.3). Le taux de décomposition augmente donc de manière disproportionnée avec l'augmentation de la température. En raison de l'amplitude thermique plus faible, le taux de décomposition diminue en général avec la profondeur du sol. D'autres effets de la profondeur d'ensevelissement sur le processus de décomposition sont résumés dans le chapitre "Mesures" (chap. 5.2. Profondeur d'ensevelissement).

### 3.2. Régime hydrique du sol

Selon l'hypothèse 3 (chapitre 2), une retenue du liquide de putréfaction dans l'espace du cercueil favorise l'apparition de cadavres conservés avec des acides gras. Cette rétention peut être due à une construction imperméable du cercueil ou à un sol détrempe.

Profondeur du sol	Température	
	Minimum	Maximum
30 cm	0,5	14
100 cm	2	12
150 cm	3	11
250 cm	4	9,5

Tab. 3.1 : Température minimale et maximale dans différentes profondeurs de sol. Source : FLÜHLER (1991)

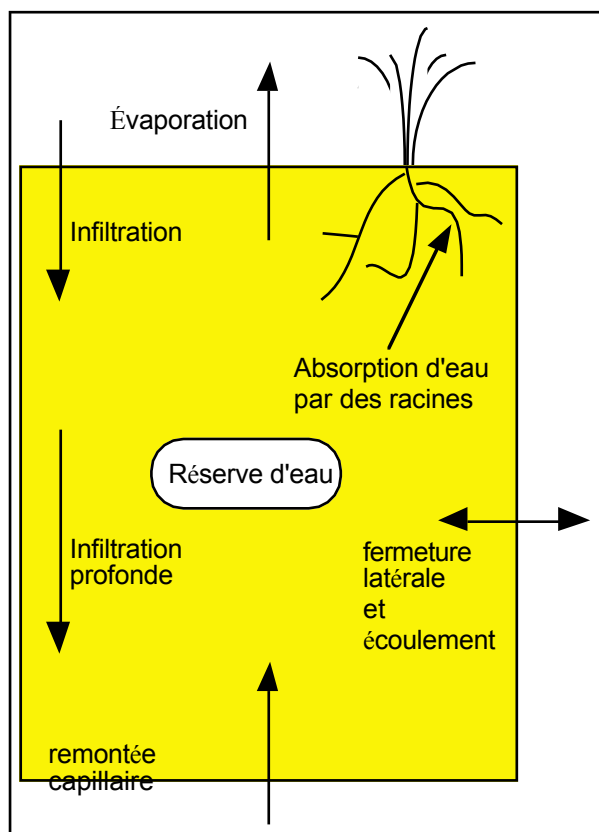


Fig. 3.1 : Interaction entre l'apport et le prélèvement d'eau : les composantes d'un bilan hydrique d'un compartiment de sol, d'après FLÜHLER (1995b) : S. 144

de l'humidité. Ce dernier est la cause la plus fréquente de troubles de la décomposition dans les cimetières du Plateau suisse, raison pour laquelle le présent chapitre se concentre sur les sols humides.

Les masses d'eau souterraines et les masses d'eau de barrage se forment sur des couches à faible conductivité de l'eau (voir ci-dessous). On parle de nappe phréatique lorsque de l'eau non liée est présente toute l'année. On parle en revanche d'eau de barrage lorsque l'eau n'est pas liée pendant une partie de l'année seulement, généralement au printemps.<sup>2</sup> Cette eau est dite non liée parce qu'elle n'est pas liée à la matrice du sol par des forces d'adsorption chimiques ou des forces capillaires physiques. La réserve d'eau du sol est supérieure à sa capacité de liaison. L'eau du sol non liée peut s'infiltrer dans des cavités, par exemple dans un cercueil, et entraver ainsi le processus de décomposition.

La réserve d'eau du sol est dans des conditions humides, principalement alimenté par de l'eau infiltrée

et drainé par l'infiltration profonde (cf. fig. 3.1). Dans le cas d'un sol supérieur bien perméable, le taux d'infiltration est donné par la quantité de précipitations. En revanche, le taux d'infiltration dépend fortement du type de sol et, avec lui, la tendance à la stagnation de l'eau (cf. chap. 3.2.1. L'espace interstitiel).

### 3.2.1. L'espace poreux

La partie abiotique du sol se compose de la matrice et de l'espace poreux. La porosité exprime la part du sol occupée par l'espace poreux. La figure 3.2 illustre les facteurs qui influent sur la porosité, à savoir la forme des grains, l'échelonnement des tailles de grains et la densité de stockage.

La teneur en eau et en air du sol se répartit sur l'espace poreux. Une grande porosité ne signifie pas pour autant qu'un sol est bien perméable à l'eau. La conductivité de l'eau du sol dépend en grande partie de la proportion de pores grossiers ( $> 50 \mu\text{m}$ )<sup>i</sup> (cf. tableau 3.2). C'est dans ces derniers que l'eau est transportée le plus efficacement. Après de fortes pluies, les pores grossiers sont évacués par la gravitation en l'espace d'un à deux jours - à condition que le sous-sol soit perméable. Au fur et à mesure que la taille des pores diminue

<sup>i</sup> Il s'agit du diamètre d'un capillaire cylindrique dont la capacité de rétention d'eau est équivalente à celle des pores du sol.



du diamètre, la résistance à l'écoulement dans les pores augmente fortement. Les pores moyens (50 à 0,2 µm) contribuent principalement au transport de l'eau par l'absorption des racines et l'évaporation. Dans les pores fins, les forces d'adsorption et de capillarité sont très fortes, c'est pourquoi l'eau ne peut plus leur être retirée.

L'échange de gaz et donc l'oxygénation du sol se fait surtout dans les pores grossiers. Cela s'explique d'une part par le fait que la conductivité diffuse des gaz dans l'air est plusieurs dizaines de fois plus grande que dans les pores aquifères.

dans les pores.<sup>3</sup> D'autre part, lors de la

l'eau s'infiltrant dans le sol, qui se répand dans l'atmosphère.

s'échappe de l'air. Avec le drainage de ces pores, un nouvel air provenant de l'atmosphère suit, ce qui entraîne un rafraîchissement général de l'atmosphère du sol. En raison du déplacement de l'air du sol, il y a, en cas d'excès de

des corps inhumés en surface (cf. chap. 5.2. Profondeur d'inhumation), des émissions d'odeurs sont possibles dans l'enceinte du cimetière avant de fortes pluies.

En tant que processus de décomposition essentiellement aérobie, la putréfaction en particulier est tributaire d'une teneur en oxygène de l'ordre de 1 %.

de l'atmosphère. En raison de la longue période de repos dans les tombes (généralement plus de 20 ans), de faibles quantités d'eau devraient suffire.

taux d'échange gazeux suffisent à la dégradation finale en aérobose.

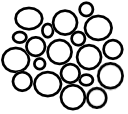

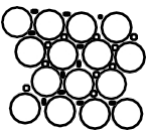
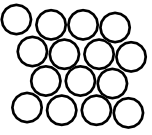
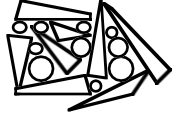

Propriété	petite porosité	grande porosité
Forme des grains	 arrondie (sable)	 encombrant (plaquettes d'argile)
Graduation de la granulométrie	 grain gradué	 grain sur une face
Stockage	 compacté, vibré, aligné	 léger, frais, secoué

Fig. 3.2 : Facteurs d'influence, lequel détermine la porosité. Tiré de FLÜHLER (1995a) : S. 20

Caractérisation de la Perméabilité	"Taux de pores grossiers" <sup>i</sup>
très peu perméable	< 5.0 %
faiblement perméable	5.0 - 9.9 %
modérément perméable	10.0 - 14.9 %
bien perméable	15.0 - 20.0 %
très perméable	> 20 %

Tab. 3.2 : Classification de la perméabilité du sol en dépendance de la "proportion de pores grossiers". Source : HALL (1977) : S. 39

<sup>i</sup> Les pores grossiers de ce tableau ne correspondent pas exactement à ceux du texte. Dans le texte, les pores d'un diamètre supérieur à 50 µm sont définis comme des pores grossiers, ce qui correspond à une pression d'aspiration inférieure à 6 kPa. En revanche, le volume des pores du tableau a été déterminé à une dépression de 5 kPa, ce qui

donne des valeurs de diamètre supérieures à 60  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.2. Texture

La répartition de la taille des pores est essentiellement déterminée par la texture du sol. La meilleure façon de l'illustrer est de prendre des exemples : Le sable mouillé se dessèche rapidement, car il contient beaucoup de pores grossiers qui conduisent l'eau. En revanche, l'espace poreux d'une motte d'argile se compose en grande partie de pores fins, raison pour laquelle elle reste humide en permanence.

Plus la granulométrie du matériau terreux est fine, plus la proportion de pores grossiers tend à diminuer au profit des pores fins (cf. tableau 3.3). Cela s'explique par l'augmentation de la surface spécifique : la surface totale des particules est plus grande par unité de volume, ce qui rapproche les différentes surfaces les unes des autres. Il en résulte des pores plus petits, dans lesquels l'eau est fortement liée par les forces capillaires.

Les minéraux argileux gonflables (p. ex. smectite, montmorillonite, vermiculite) se caractérisent par une surface spécifique particulièrement grande, car même les faces internes du cristal sont accessibles à l'eau et aux ions, ce qui explique la capacité d'expansion de ces minéraux argileux.<sup>4</sup> En revanche, la porosité reste plus ou moins inchangée lorsque la granulométrie varie (voir figure 3.3).

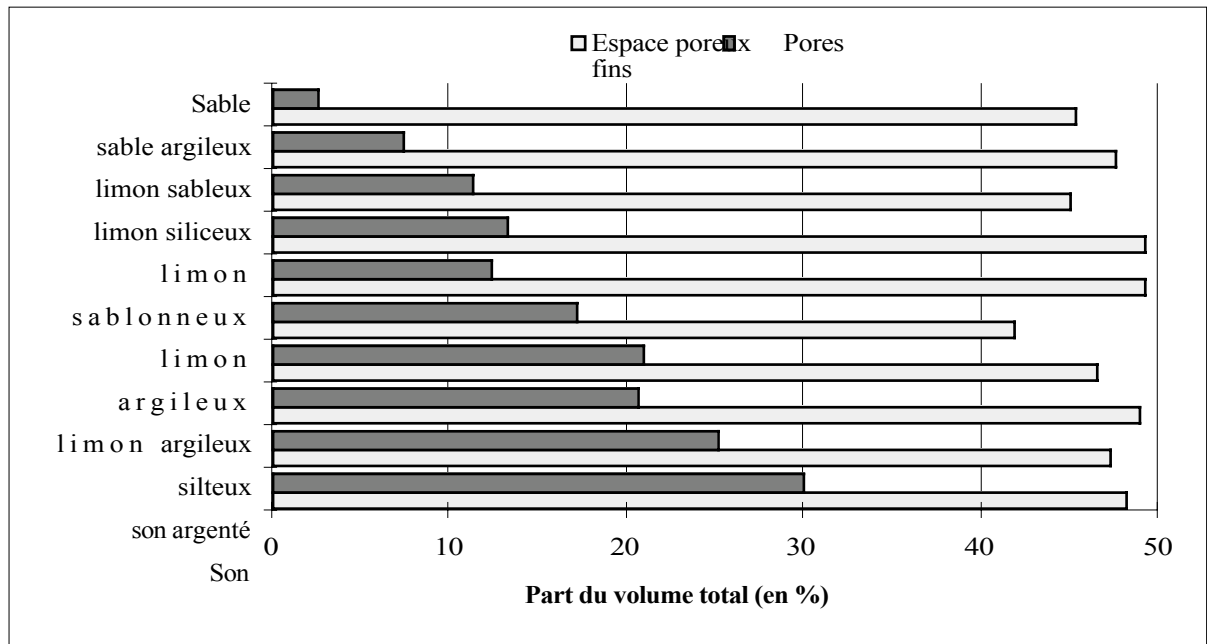


Fig. 3.3 : Espace poreux et pourcentage de pores fins dans des sous-sols (horizons E, B et C) de granulométrie différente. Les données présentées sont des valeurs moyennes issues d'une série de mesures. Source : HALL (1977) : p. 35-37. La figure 3.4 présente la composition de la terre fine des différents types de sol.

	Porosité	Pores grossiers (%)	Pores moyens (%)	Pores fins (%)
Sols sableux	0.46 ± 0.10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Sols d'argent	0.47 ± 0.90	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Sols argileux	0.50 ± 0.15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10

Tab. 3.3 : Porosité et proportion des zones de taille des pores par rapport au volume total du sol dans les sols minéraux (teneur en C < env. 2 %) et les sols organiques. (Légèrement modifié à partir de SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1992) : p. 149)

Dans les matériaux terreux à grains fins, les forces physiques de capillarité ne sont pas les seules à entraîner une rétention d'eau accrue. Des forces d'adsorption chimiques participent également à la fixation de l'eau. La fixation de l'eau (mais aussi de composés dissous ou gazeux) se fait sur les sites d'adsorption à la surface des particules. La capacité d'adsorption d'un sol augmente avec la surface spécifique et le nombre de sites d'adsorption par unité de surface. Ce dernier point dépend de la composition minérale. Parmi les particules minérales du sol, les minéraux argileux sont d'une importance particulière.

Outre une grande surface spécifique, ils se caractérisent par une importance. Les cellules d'adsorption sont caractérisées par une densité de sites d'adsorption considérable, ce qui explique leur forte capacité de rétention d'eau.

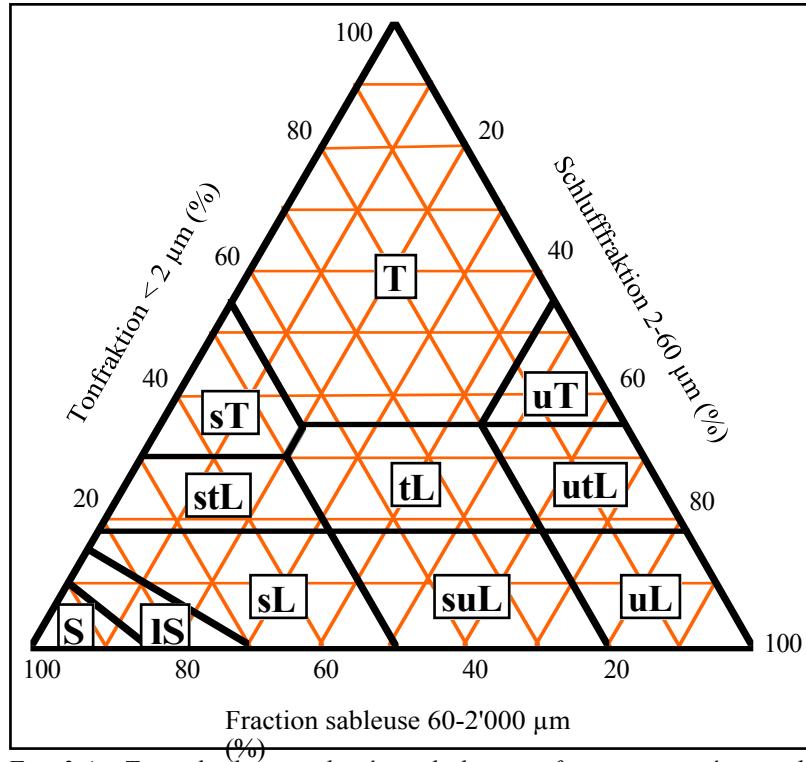


Fig. 3.4 : Triangle de granulométrie de la terre fine pour représenter le type de sol d'après HALL (1977) : p. 32.

Légende : T = sol argileux, uT = argile silteuse, sT = argile sableuse, tL = limon argileux, utL = limon argileux silteux, stL = limon argileux sableux, uL = limon silteux, suL = limon silteux sableux, sL = limon sableux, IS = sable argileux, S = sable

### 3.2.3. Formation de la structure

Outre la texture, la formation de la structure du sol est également importante pour la conductivité de l'eau. Les particules individuelles peuvent se lier entre elles, ce qui donne naissance à des particules secondaires (agrégats). En raison de la formation d'agrégats, il se forme dans le sol des pores secondaires qui, par rapport aux pores primaires, ont un diamètre plus grand et plus constant, sont moins tortueux et se présentent généralement dans le sens vertical.<sup>5</sup> Avec la structuration, un système de pores secondaires se superpose aux pores primaires liés à la texture, ce qui augmente la perméabilité à l'eau du sol (fig. 3.5).

Les pores secondaires comprennent les fissures de rétraction et de retrait, les canaux racinaires ainsi que les tubes, les galeries et les chambres des animaux vivant dans le sol. Outre les facteurs biotiques, la formation des agrégats du sol est due aux variations d'humidité et de température. Les processus structurants mentionnés s'affaiblissent tous avec la profondeur du sol. La présence d'animaux et de racines est bien plus importante dans la couche supérieure humifère que dans les horizons minéraux plus profonds. De même, les

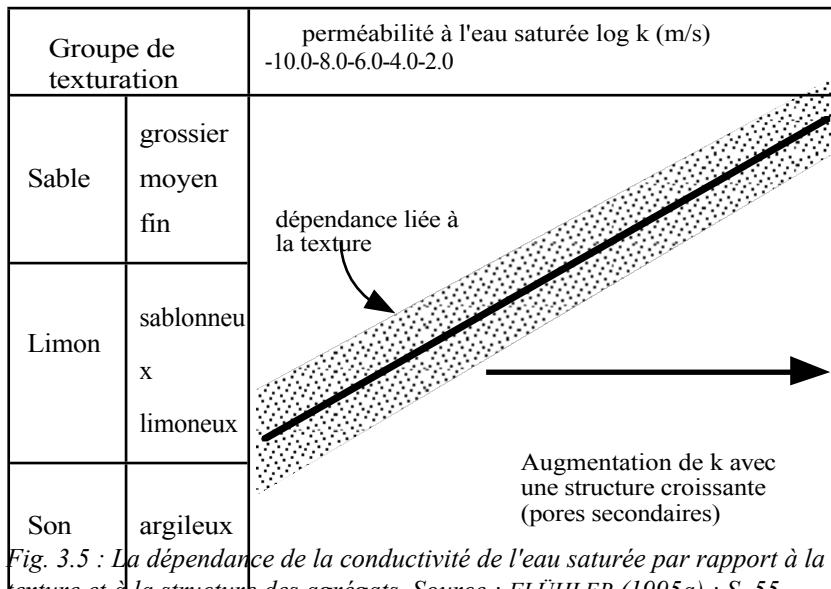


Fig. 3.5 : La dépendance de la conductivité de l'eau saturée par rapport à la texture et à la structure des agrégats. Source : FLÜHLER (1995a) : S. 55

Les variations de température et d'humidité diminuent avec la profondeur du sol : Dans le site Sous-sol le point de congélation pas plus en dessous de la température et il n'y a pratiquement plus de risque d'assèchement. conditions de dessèchement. Pour ces raisons, l'importance des pores secondaires diminue avec la profondeur du sol.

### 3.3. Conditions de décomposition dans différents sols

Afin d'éviter les troubles de la décomposition, les sols des cimetières doivent répondre à des exigences en matière de drainage. Le sol doit être suffisamment conducteur d'eau pour que des conditions de saturation en eau ne puissent pas régner dans l'espace funéraire pendant une période prolongée. Cette exigence implique l'absence d'horizons de sol empêchant l'infiltration ou retenant l'eau. L'eau stagnante se forme au-dessus d'un horizon de sol à faible conductivité d'eau. Ceux-ci se caractérisent en premier lieu par une surface spécifique élevée (en particulier une teneur élevée en argile) et en second lieu par une densité de dépôt élevée (cf. tab. 3.4).

En raison de la pression du sol, la densité naturelle du dépôt augmente généralement de manière continue avec la profondeur. Dans les champs d'inhumation, il faut toutefois s'attendre à une discontinuité au niveau du fond de la tombe, qui peut être attribuée à une densité de dépôt plus faible après le remblayage d'une tombe. Le sol est donc ameubli jusqu'au fond de la tombe. En dessous, on trouve la zone de sol naturel ou même compacté. La possibilité d'une zone d'accumulation est donc à attendre en priorité sous le fond de la tombe.

Mais la tendance à la formation d'une couche d'accumulation dépend probablement encore plus de la teneur en argile des horizons du sol que de la densité du dépôt. Leur grande surface spécifique et leur capacité de rétention d'eau considérable permettent aux minéraux argileux de freiner l'infiltration profonde de l'eau du sol. En raison de la forte proportion de pores fins et des puissantes forces d'adsorption, une partie considérable de la cavité du sol reste occupée par de l'eau immobile. Après des précipitations, la section d'écoulement restante n'est pas suffisante pour permettre l'infiltration des quantités d'eau. Les sols avec des horizons fortement argileux dans le sous-sol doivent donc être considérés comme inappropriés pour les cimetières.

Outre les sols riches en argile, la littérature pédologique fait état de sols de barrage riches

en silice (pseudogleys à humidité adhérente).<sup>6</sup> En Suisse, il faut mentionner dans ce contexte les sols siliceux très denses qui se s o n t formés à partir de matériaux de moraines de fond.<sup>7</sup>  
Ainsi

il faut également émettre des réserves sur les sols à forte teneur en silice qui doivent être utilisés comme substrats pour les inhumations. Pour garantir l'infiltration en profondeur, le sol devrait donc contenir une certaine quantité de matériau à gros grains (sable ou squelette de sol). Cela doit être particulièrement exigé pour les horizons de sol autour et en dessous du fond de la tombe.

Aucune étude n'a été réalisée sur la dépendance de la décomposition des corps au type de sol. Des données provenant d'un grand nombre de cimetières différents, contenant la texture, la densité de dépôt et la qualité de décomposition, permettraient probablement de tirer des conclusions plus précises sur les exigences auxquelles doivent répondre les sols de cimetière. La texture et la densité de dépôt devraient être déterminées dans les différents horizons du sol. L'expérience acquise ne serait pas seulement utile pour l'évaluation de nouveaux terrains de cimetière, mais aussi pour la rénovation de cimetières.

Classe de taille des particules	Perméabilité à l'eau pour différentes densités de stockage		
	petit ( $< 1,40 \text{ g cm}^{-3}$ )	moyen ( $1,40 - 1,75 \text{ g cm}^{-3}$ )	élevé ( $> 1,75 \text{ g cm}^{-3}$ )
Son	-	faible	très faible
argile sablonneuse	-	(faible)	faible
son argaté	-	modéré	très faible
limon argileux sableux	-	faible	faible
limon argileux	fort	modéré	faible
limon argileux silteux	bien	modéré	faible
argile siliceuse	-	(modéré)	-i
argile siliceuse sableuse	fort	modéré	-i
limon sableux	fort	bien	modéré
sable argileux	fort	fort	(modéré)
Sable	(fort)	fort	(fort)

Tab. 3.4 : Perméabilité à l'eau dans le sous-sol (horizons E, B, C) pour différentes classes de taille de particules et pour différentes densités de stockage. La perméabilité est définie conformément au tableau 3.2. Légende : ( ) = données limitées, - = données insuffisantes. source : HALL (1977) : P. 39

<sup>i</sup> Ces catégories correspondent aux sols morainiques, dont la perméabilité à l'eau peut être qualifiée de faible. (communication orale de Hj. Büchi)

### 3.4. Impact de l'activité funéraire sur le sol

Comme le montre l'exemple suivant, datant du siècle dernier, la tendance à la formation d'adipocytes peut évoluer au fil du temps : Au cimetière du Père la Chaise à Paris, les enterrements se faisaient à 1,5 mètre de profondeur, cercueil contre cercueil. Le temps de repos des tombes était extrêmement court : Les tombes étaient réoccupées au bout de cinq ans seulement. Alors que les corps inhumés pour la première fois étaient encore entièrement squelettiques, la formation d'adipocire apparaissait déjà partiellement lors de la deuxième inhumation. Lors de la troisième inhumation, la conservation de l'acide gras s'est généralisée.<sup>8</sup>

Les raisons de cette consommation accrue d'acides gras ne sont pas claires. Les troubles de la décomposition pourraient être dus d'une part à la densité et à la fréquence d'occupation exceptionnellement élevées. Les planches de cercueil, qui ont peut-être formé un "horizon de bois" empêchant l'infiltration, pourraient en être la cause. Dans le cas du cimetière décrit, il s'agirait alors d'un cas isolé qui ne permettrait pas de tirer des conclusions pour d'autres champs de tombes. D'autre part, la décomposition des corps pourrait aussi être liée à des processus du sol qui conduisent à des conditions de décomposition défavorables. Dans ce cas, il devrait être possible d'établir un lien statistique entre la fréquence d'occupation d'une tombe et la formation d'adipocytes, du moins pour certains types de sol.

Les fonctionnaires des pompes funèbres sont parfois d'avis que la formation de lipides cadavériques a augmenté au cours des dernières décennies. Cependant, même si cette observation s'avérait exacte, elle ne devrait pas être considérée comme une preuve de l'existence de "sols fatigués par la décomposition". Outre les conditions du sol, d'autres facteurs peuvent évoluer au fil des ans et avoir un impact sur la décomposition des cadavres. Par exemple, l'état nutritionnel de la population et donc la teneur en graisse des corps humains : après l'hiver de famine de 1945, les corps enterrés à cette époque n'ont pas consommé d'acides gras.<sup>9</sup> Depuis, l'obésité a augmenté en raison du changement des habitudes alimentaires et du manque d'activité physique. Cela pourrait également avoir entraîné une augmentation de la formation d'adipocytes au cours des dernières décennies, indépendamment des conditions du sol.

Il n'est pas prouvé que l'augmentation du nombre d'occupants s'accompagne d'une détérioration de la décomposition des corps. Pour de nombreux cimetières qui présentent aujourd'hui des troubles de la décomposition (conservation des acides gras), il faut plutôt partir du principe que le sol était déjà inadapté à la décomposition des corps au début de l'activité funéraire. Toutefois, la détérioration de la qualité de décomposition évoquée est également envisageable. Pour étayer cette possibilité, il faudrait toutefois montrer comment la pratique funéraire peut provoquer une diminution de la conductivité de l'eau du sol. Les facteurs à l'origine d'une telle modification sont principalement deux interventions effectuées lors de l'inhumation : le creusement de la tombe et l'apport de matière organique dans le sous-sol. On peut en déduire différents processus qui pourraient contribuer à la formation d'une zone d'accumulation.



### 3.4.1. Mécanique Compactage du sol

Sous l'effet de forces extérieures, les matériaux terreux non compactés peuvent être comprimés et les pores secondaires détruits (cf. fig. 3.2). Le plus souvent, cela se produit lorsque des véhicules lourds circulent sur le sol, ce qui comprime la couche supérieure. La question est de savoir si, pendant le creusement de la tombe, des forces peuvent entraîner une compression de la couche de sol *sous le* fond de la tombe. Une plus grande densité de stockage qui en résulterait entraînerait une moindre conductivité de l'eau et favoriserait l'humidification du sol.

Le fond de la tombe se trouve généralement à une profondeur de 1,5 à 2 mètres. A ces profondeurs, la densité du dépôt est déjà naturellement assez élevée. A deux mètres de profondeur, on trouve 20  $\text{dm}^3$  de terre par décimètre carré. Avec une densité de stockage moyenne de 1,5  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , cela représente 30 kg de poids par décimètre carré, soit 0,3 bar de pression naturelle du sol au fond de la fouille. Un compactage supplémentaire nécessite donc des pressions plus fortes. Lors de l'excavation mécanique, la pression verticale exercée par le godet sur le sol est plutôt faible. Si les tombes sont creusées à la main, le poids du corps agit sur le sol. Un calcul approximatif montre son ordre de grandeur : le poids du corps (75 kg) doit être réparti de manière égale sur les deux semelles de chaussures (5  $\text{dm}^2$ ). Il en résulte une pression au sol de 0,15 bar. En se déplaçant sur la semelle de la tombe, cette pression augmente toutefois de plus du double en fonction de la surface d'appui. Un certain compactage du sous-sol n'est donc pas à exclure. En particulier dans le cas de sols argileux et "relativement mous", un compactage par destruction de la structure est envisageable.<sup>10</sup>

### 3.4.2. Mécanique Couche abrasive

La formation d'une couche abrasive est envisageable dans un substrat argileux, si l'on tire le long du fond de la fouille avec la pelleuse. Les fines plaquettes d'argile s'alignent horizontalement, ce qui entraîne une diminution verticale de la conductivité de l'eau. Pour illustrer cet effet, appelé *anisotropie*, on peut le comparer à l'arrosage d'un toit de chaume : Bien que le gradient hydraulique soit dirigé vers le bas au sens de la force de gravitation, l'eau s'écoule principalement dans le sens de la couche de paille. Elle ne pénètre que lentement dans le toit, perpendiculairement à la stratification, et ce n'est qu'en cas de débordement qu'elle s'égoutte de la face inférieure.<sup>11</sup>

Dans le cimetière, la formation d'une couche abrasive et son éventuel effet de rétention d'eau doivent toutefois encore être examinés. Lors de l'étude de terrain dans le cimetière de Zurich-Affoltern (voir ci-dessous), l'excavation a été effectuée à l'aide d'une pelleuse à deux mains. Après le remplissage, celle-ci a arraché la terre du sol. La surface restante avait la qualité d'une fracture. La formation d'une couche abrasive n'était pas à craindre.

---

<sup>1</sup> On parle d'anisotropie pour les structures du sol lorsque la perméabilité varie en fonction du sens d'écoulement.

### 3.4.3. Podsolisation

#### 3.4.3.1. Généralités Introduction

La podzolisation est un transfert vers le bas de substances organiques dissoutes (polyphénols, acides carboxyliques, polysaccharides, acides fulviques) et de fer et d'aluminium liés de manière complexe. Ce transfert s'effectue du sol supérieur organique vers le sous-sol minéral. La podzolisation est favorisée par des sols sableux, des conditions fortement acides et des conditions fraîches et humides, ce qui inhibe la dégradation microbienne des composés organiques. Les podzols se développent donc dans des endroits où les précipitations sont abondantes, où les températures moyennes annuelles sont basses et où les sols sont pauvres en calcium et en magnésium.<sup>12</sup> Dans un sous-horizon, les substances dissoutes précipitent à nouveau et s'enrichissent progressivement. Ces dépôts correspondent à une densification de l'horizon, ce qui peut entraîner une forte diminution de la conductivité de l'eau. En cas de podzolisation importante, le résultat est un horizon illuvial de pierre locale.

La libération de métal dans l'horizon éluvial est due à un processus d'altération à la surface du minéral. Ce processus est provoqué par des acides, des bases (généralement sans importance dans le sol), des agents chélatants et par la réduction du métal :<sup>13</sup>

- Le taux de dissolution augmente fortement lorsque le pH diminue.<sup>14</sup> Dans la plupart des cas d'altération des minéraux, des concentrations d'acide comprises entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  N sont toutefois nécessaires pour obtenir un taux de réaction significativement plus élevé que celui de l'hydrolyse.<sup>15</sup> Les réactifs impliqués sont principalement les protons libres et les acides organiques de faible poids moléculaire.<sup>16</sup>
- La chélation favorise surtout la libération d'aluminium, de fer et de manganèse ainsi que de métaux lourds. Outre les ligands simples (acide salicylique, acide tartrique, acide citrique, acide oxalique), des substances humiques (en particulier les acides fulviques) peuvent également être impliquées. Les agents chélatants réduisent en outre la reprécipitation des ions métalliques. A des concentrations de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  N, des quantités inhabituellement élevées d'aluminium peuvent être maintenues dans l'eau du sol.<sup>17</sup>
- Le sulfure d'hydrogène ou le sulfure d'hydrogène sont des agents réducteurs particulièrement efficaces pour les oxydes de fer.<sup>18</sup> En l'absence d'oxygène, une réduction induite par des bactéries a également lieu pour les oxydes de fer et de manganèse. Pour cela, des bactéries anaérobies  
Les bactéries, qui sont généralement fixées à la surface des particules, en sont responsables.

La reprécipitation des complexes organométalliques peut être due à de nombreuses raisons :

- Au moins au stade initial de la podzolisation, un pH et une saturation en Ca plus élevés dans le sous-horizon semblent être un facteur essentiel. Cela pourrait conduire d'une part à la décomposition des complexes organométalliques et d'autre part à leur floculation. De plus, une polymérisation des acides organiques de faible poids moléculaire pourrait être favorisée, ce qui diminuerait leur solubilité.<sup>19</sup>
- La solubilité des complexes organométalliques diminue avec l'augmentation de la teneur en métal. La biodégradation des ligands ou bien une addition supplémentaire d'ions d'aluminium et de fer entraînent une précipitation de ces complexes.<sup>20</sup>

- En présence d'acides fulviques et humiques, des complexes insolubles peuvent se former.<sup>21</sup>
- Les gisements de fer et de manganèse dissous peuvent être amenés à précipiter par oxydation et formation d'oxydes.<sup>22</sup>

Un horizon d'enrichissement déjà formé agit lui-même comme un filtre où les complexes métalliques organiques sont sortis. Cela favorise la précipitation dans un horizon relativement étroit.

### 3.4.3.2. Solarisation du pod sur Profondeur d'inhumation

Dans un cimetière, le fond de la tombe constitue, en plus de la terre végétale, une deuxième transition entre le matériau organique et le matériau minéral. Les conditions pour un processus de podzolisation sont cependant défavorables au fond de la tombe. Contrairement à la terre végétale, on peut supposer que le sol est calcaire à la profondeur de l'inhumation. En présence de calcaire, les ions de calcium et le carbonate d'hydrogène prédominent dans la solution du sol.<sup>23</sup> Cela a des conséquences importantes sur le processus d'altération :

- Le carbonate tamponne la concentration de protons à un niveau bas, ce qui fait que l'altération influencée par les protons perd de son importance.
- Le calcium contribue à une immobilisation rapide des substances organiques.<sup>24</sup> Cela affecte l'altération accélérée par les acides organiques et les agents chélatants.
- A des valeurs de pH comprises entre 3 et 3,5, la réduction de  $\text{Fe}^{3+}$  en  $\text{Fe}^{2+}$  a déjà lieu. a lieu en dessous d'un potentiel d'oxydoréduction de 500-400 mV, un potentiel que l'on peut trouver même dans des sols perméables.<sup>25</sup> Pour des concentrations de protons plus faibles, le potentiel d'oxydoréduction chute rapidement à des valeurs qui ne peuvent pratiquement plus être atteintes dans la chambre funéraire. Une libération d'ions métalliques réduits ne peut donc pas avoir lieu dans une mesure significative en raison du tamponnage du pH de la chaux.

Mais même dans des conditions sans calcaire, il ne faudrait guère s'attendre à un fort impact sur le taux d'altération. D'une part, la décomposition des cadavres se fait principalement de manière anaérobie, ce qui entraîne une alcalinisation de l'environnement. L'altération due aux protons est donc localement atténuée. D'autre part, on peut se demander si les composés organiques dissous qui pénètrent dans le sol se situent dans une fourchette de quantité qui permette d'envisager une influence perceptible sur le taux d'altération. Il faudrait pour cela déterminer les concentrations d'acides organiques et d'agents chélatants dans la solution du sol en dessous du fond de la tombe et comment ces concentrations évoluent au fil du temps.

Outre les doutes qu'il convient de nourrir quant à une libération supplémentaire d'ions métalliques dans la chambre funéraire, il faut également mettre un grand point d'interrogation derrière sa capacité à être déplacée. Lors de la décomposition des corps, des sulfures et du sulfure d'hydrogène sont libérés, ce qui entraîne la précipitation du fer divalent. Cet événement est effectivement confirmé par des observations faites lors de fouilles de fossiles : Les squelettes retrouvés dans des roches sédimentaires sont souvent entourés de précipités de pyrite, eux-mêmes enfermés dans des dépôts calcaires. Les précipités calcaires sont probablement dus à l'augmentation du pH provoquée par la décomposition anaérobie du corps de l'animal.<sup>26</sup>

Les études de Bethell et Carver (1987) sur les sols de cimetière permettent néanmoins de conclure à un certain déplacement de manganèse.<sup>27</sup> La terre de cimetière présentait, surtout aux endroits,

où les restes du corps ont été trouvés, une couleur de sol plus foncée. Cette zone du sol a été analysée, ainsi que la silhouette du sol qui avait encore la forme du squelette humain. Une analyse chimique de la silhouette a révélé des valeurs élevées de phosphore, de cuivre et de manganèse par rapport à la terre de référence. La teneur en manganèse était également plus élevée que dans un squelette frais. Bethell et Carver ont donc supposé que le manganèse avait été extrait des zones de sol environnantes pendant le processus de décomposition et qu'il s'était concentré autour du cadavre. Ils ont expliqué les valeurs élevées de cuivre par la libération et la concentration pendant la décomposition de l'os. Ces résultats ont été obtenus dans un sol argileux.

Les acides organiques libérés peuvent légèrement accélérer les processus d'altération à court terme. Il ne faut cependant pas s'attendre à une augmentation significative de la quantité d'ions métalliques ou de composés organiques transférés. Cela serait pourtant nécessaire si un processus autrement long devait avoir un impact significatif sur le régime des eaux en quelques décennies.

### **3.4.4. Organique Bouchage des pores**

#### **3.4.4.1. Par Humines**

Dans la nature, la matière organique s'accumule principalement à la surface du sol. Leur décomposition produit des substances humiques qui sont d'une grande importance pour le sol. Il convient de souligner leur importance pour la structuration du sol. Les molécules humiques s'assemblent dans n'importe quel ordre pour former des réseaux tridimensionnels peu structurés. Ces constructions sont accessibles à l'eau et aux ions de tous les côtés. Il en résulte des propriétés telles qu'une grande capacité de rétention d'eau ou une grande capacité d'échange de cations (CEC). Grâce à la réticulation tridimensionnelle, le sol gagne en outre en élasticité, ce qui lui confère une certaine protection contre le compactage. La formation d'agrégats argilo-humiques permet en outre d'améliorer l'aération du sol.

La structuration des substances humiques est fortement liée à la vie du sol. Mais les animaux du sol, en particulier, sont généralement absents à des profondeurs d'inhumation proches de deux mètres. L'humus reste donc non structuré sur le fond de la tombe.<sup>28</sup> Les effets favorables à la décomposition sur les paramètres physiques du sol mentionnés ci-dessus ne peuvent donc pas se manifester. Selon le manuel d'hygiène de 1912, un enrichissement de l'humus provoque au contraire une augmentation des troubles de la décomposition : "En raison de l'accumulation de substances humiques due à la décomposition des cadavres, à laquelle correspond également une réduction des espaces interstitiels, il devient "fatigué de la décomposition", fournit d'abord une décomposition retardée et finalement la mise en œuvre anormale de la formation de cire cadavérique".<sup>29</sup>

Il est peu probable que la couche d'humus qui se forme sous le squelette soit elle-même la cause d'une accumulation d'eau. Par contre, des molécules humiques pourraient être déplacées vers l'horizon minéral et y provoquer un colmatage des pores conducteurs d'eau. En raison de la nature calcaire du sol, ce déplacement ne devrait toutefois pas se produire sur de longues distances. Un éventuel colmatage des pores se limite à la zone du sol située sous la couche d'humus. C'est pourquoi, au moins dans l'espace inter-tombes, il faudrait que l'on puisse utiliser la méthode normale.

l'infiltration en profondeur. Selon OTTMANN, il faut compter avec une surface de cimetière de 9 m<sup>2</sup> et une surface de tombe de 3 m<sup>2</sup> par tombe.<sup>30</sup> L'infiltration devrait donc pouvoir suivre son cours normal sur les deux tiers du terrain du cimetière.

#### 3.4.4.2. Par Bactéries

Les bactéries qui se forment en grand nombre dans le corps pendant la décomposition du cadavre sont en partie emportées hors du corps par le liquide cadavérique qui s'en écoule. Avec l'eau d'infiltration, elles parviennent dans l'horizon minéral, où elles peuvent être retirées de l'eau par filtration ou par adhésion. Dans différents sols sableux, l'effet de la filtration s'est avéré inversement proportionnel à la taille des particules. De plus, la taille et la forme des bactéries ont une influence sur leur filtrabilité.

Pour l'adhérence, les minéraux argileux sont un substrat idéal en raison de leur forme plane et de leur grande surface spécifique.<sup>31</sup> L'adhérence gagne donc en importance avec la teneur en argile des sols. Les concentrations élevées de cations sont également favorables. et des valeurs de pH basses.<sup>32</sup> L'adhésion dépend également du type de bactérie.

Lors d'une expérience en laboratoire<sup>33</sup>, il s'est avéré que, dans le cas d'un bon approvisionnement en nutriments, les bactéries se sont développées en un biofilm après avoir adhéré aux pores du sol. La porosité et la conductivité de l'eau s'en trouvent considérablement réduites. Dans les pores de petite taille, cet effet est encore renforcé par la filtration.

Dans la nature, ce phénomène se produit dans les aquifères pollués, où la croissance bactérienne affecte la conductivité de l'eau.<sup>34</sup> En revanche, il n'existe aucune description de ce type pour les sols. Dans la couche supérieure du sol, la formation de biofilms est intégrée dans les interactions dynamiques entre les facteurs écologiques biotiques et abiotiques : Les obstructions de pores sont compensées par des processus de formation de pores et n'ont donc pas d'importance. Dans le sous-sol minéral, l'apport continu de nutriments, nécessaire à la croissance bactérienne, ne devrait normalement pas être garanti.

Pour évaluer plus précisément la portée d'un éventuel colmatage des pores par la formation d'un biofilm, il serait nécessaire d'étudier le comportement de propagation des catabolites de putréfaction sous le fond de la fosse. L'extension spatiale de l'obstruction bactérienne des pores dépend du modèle de diffusion des substances nutritives, la concentration en substances nutritives détermine l'épaisseur maximale possible du biofilm<sup>35</sup>. Mais pour qu'il y ait une croissance bactérienne, la concentration en nutriments doit dépasser une valeur seuil.<sup>36</sup> Une baisse de l'approvisionnement en nutriments en dessous de la valeur seuil devrait alors entraîner la décomposition du biofilm.<sup>37</sup> Mais comme pour la podzolisation, il faut noter que l'effet de barrière du fond du cercueil et la teneur en calcaire du sol entravent la propagation des composés organiques dans le sol.

Après la formation éventuelle d'un biofilm, l'infiltration des nutriments s'affaiblira rapidement avec la fin de la putréfaction cadavérique, ce qui devrait conduire à une dégradation autolytique du film bactérien. Suite à une inhumation, la formation d'un biofilm peut donc tout au plus être un phénomène temporaire. Si l'autolyse devait s'accompagner d'une libération de spores,<sup>38</sup> cela pourrait avoir un effet accélérateur sur la croissance bactérienne après une nouvelle occupation de la tombe. Mais comme il s'agit d'une inhumation

Si l'apport de nutriments est très limité, il ne faut pas s'attendre à la formation d'un biofilm, même dans ce cas.

### 3.4.5. Déplacement du sol

Au début de ce chapitre, la surface spécifique et la densité de stockage ont été présentées comme les deux principaux facteurs influençant la formation de la couche d'accumulation. Dans un horizon d'enrichissement argileux formé par déplacement, ces deux facteurs sont augmentés. L'effet sur la surface spécifique doit être particulièrement souligné. Les minéraux argileux à forte capacité de gonflement ne se caractérisent pas seulement par une grande surface spécifique, ils sont aussi plus facilement dispersés et déplacés. Un horizon de dépôt d'argile devrait donc être reconnaissable à une plus grande proportion de minéraux argileux gonflants.

Le déplacement de l'argile dépend fortement de la valeur du pH. Les valeurs comprises entre 5 et 7 sont favorables au transfert. A des valeurs de pH plus élevées, des saturations élevées en calcium entraînent la précipitation des minéraux argileux, tandis qu'à des valeurs plus basses, les ions aluminium empêchent leur transfert. De plus, la concentration en sel de l'eau du sol influence le processus de déplacement des minéraux argileux. Une faible concentration d'ions entraîne la formation d'un manteau d'eau plus important autour d'une particule d'argile, ce qui augmente ses propriétés hydrophiles.<sup>39</sup>

La précipitation des minéraux argileux peut être causée par une augmentation de la concentration en sel ou de la saturation en calcium dans un horizon de sol plus profond. Ces derniers provoquent une floculation des minéraux argileux qui s'accumulent dans les pores sous forme de revêtements de paroi typiques (cutane argileuse).<sup>40</sup> Le deuxième processus de dépôt important dans le sous-sol est probablement la filtration des particules d'argile dans les horizons à grains fins.

Outre le stockage de minéraux argileux, un enrichissement peut également se produire par la formation d'argile. Avec la pratique funéraire, il faut prendre en considération trois facteurs qui peuvent conduire à la formation d'argile :

- Les minéraux argileux se forment en grande partie à partir de l'altération des silicates, qui peut être accélérée principalement par l'action des acides, mais aussi par la complexation et la réduction. Tant les acides que les agents chélatants et réducteurs sont expulsés du cadavre sous forme de catabolites de putréfaction. En raison de la teneur en calcaire, il ne faut toutefois pas s'attendre à une altération forcée des silicates à la profondeur de l'inhumation (cf. chapitre 3.4.3.2. Podsolisation à la profondeur de l'inhumation).
- Après l'ammonium, le sodium est le deuxième cation le plus fréquemment retrouvé dans la solution du sol sous un cadavre.<sup>41</sup> Il possède une forte force d'attraction sur l'eau. C'est pourquoi les particules de sol chargées d'ions sodium gonflent fortement et peuvent se décomposer en particules plus petites. Il en résulte des minéraux argileux fins comme de la poussière, qui s'infiltrent avec l'eau du sol et peuvent provoquer des obstructions de pores.<sup>42</sup> La liaison du sodium aux minéraux argileux est concurrencée par le calcium et le magnésium. Les concentrations de ces derniers doivent donc être faibles pour que le processus décrit puisse avoir lieu.
- L'excavation de la tombe entraîne une destruction partielle des agrégats du sol. Des minéraux argileux peuvent ainsi être mis à nu aux endroits de rupture et, si les conditions le permettent, être déplacés avec l'eau du sol.

La formation d'argile par altération des silicates ou par "effet de sodium" échoue sur le Plateau suisse en raison de la forte saturation en calcium à la profondeur de l'inhumation. Pour la même raison, les minéraux argileux arrachés aux agrégats du sol ne peuvent pas être déplacés jusqu'au fond de la tombe et flocculent encore dans la zone de sol ameublie par le creusement de la tombe.

### 3.5. Investigations de terrain au cimetière Zurich-Affoltern

Au début du travail de diplôme, il était supposé qu'en cas d'occupation répétée des tombes le site Dégradation

*Tab. 3.5 : Désignation abrégée et caractérisation des fentes de dragage (BS) dans le cimetière de Zurich-Affoltern.*

dans les cadavres enterrés des cadavres pourrait augmenter. Divers indices ont été trouvés qui plaident en faveur de l'existence de "sols fatigués par la décomposition". En revanche, aucune preuve claire n'a été apportée. Investigations de terrain dans le cimetière

BS 1	Situé dans la partie ancienne du cimetière. C'est ici que se déroulaient jusqu'à environ 1930 enterrements ont eu lieu.
BS 2	Sol de référence pour BS 3 en aval de la nappe phréatique
BS 3	Situé dans le champ de tombes 1, où l'on enterrera bientôt pour la deuxième fois. La première inhumation a eu lieu il y a environ 25 ans.
BS 4	Sol de référence pour BS 3 remontée du flux d'eau souterraine- vers le haut
BS 5	La tombe ouverte dans le champ funéraire actuel était également disponible.

Zurich-Affoltern devraient permettre de progresser dans l'élucidation de cette question. Cinq tranchées de dragage (BS) étaient à disposition pour des observations et des prélèvements d'échantillons (cf. tab. 3.5). Une description plus détaillée du sondage ainsi que le matériel de données sont présentés dans l'annexe D.

#### *Propriétés du sol*

Dans les BS 2, BS 3 et BS 4, la plupart des horizons de sol minéraux sont caractérisés par du gravier sableux. Par conséquent, la capacité d'infiltration est bonne : bien que des

précipitations modérées à très fortes se soient produites au cours des trois jours précédents, les profils de sol considérés se sont avérés déjà bien drainés.

*Résultat de la décomposition des corps dans le BS 3*

La partie du crâne de l'un des corps a été dégagée. Celle-ci était entièrement squelettique. Aucun résidu organique n'a été laissé à l'intérieur du crâne. La partie des pieds de la tombe adjacente à la tête était également entièrement décomposée. Seules les chaussettes en fibres synthétiques sont restées non décomposées. Aucune émission d'odeur n'a pu être perçue dans cette fente de dragage. Des restes de bois fortement dégradés ont été laissés par les cercueils, mais aucune planche n'a été retrouvée.



### *Découverte de la décomposition de deux corps dans le BS 1*

Les restes rencontrés présentaient une squelettisation complète. Les os étaient en partie spongieux et s'effritaient facilement. Le bois du cercueil était complètement décomposé et le contour du cercueil n'était reconnaissable que par une coloration brune plus prononcée du substrat du sol.

### *Observations*

- Lors de l'inspection du profil, aucun signe de formation de couche d'accumulation n'a été constaté dans le BS 1 ni dans le BS 3. En particulier, aucun signe de conditions réductrices n'était visible. En raison des bonnes propriétés de drainage du sol, on ne pouvait pas non plus s'y attendre. Cependant, les fouilles de cimetières médiévaux à Zurich (Münsterhof)<sup>43</sup> et à Aesch LU<sup>44</sup> n'ont apparemment pas non plus révélé de caractéristiques rédoximorphes.
- Aucun horizon de dépôt organique n'a pu être identifié sous le fond de la tombe. Dans la BS 3, les restes de bois fortement altérés étaient encore clairement délimités par rapport au sable sous-jacent. Dans la BS 1, où le bois de cercueil était décomposé, les limites avec le sol environnant étaient légèrement floues. La fraction organique n'a cependant pas révélé d'autres phénomènes de déplacement.
- Un intérêt particulier a été porté aux différences entre le BS 3 et ses profils de référence BS 2 et BS 4. La différence la plus frappante était l'assise perturbée du BS 3. Contrairement aux profils de référence, le matériau terreux du BS 3 s'effritait d'une paroi latérale et de la paroi du profil.
- En raison du processus de remaniement pendant l'occupation des tombes, le calcaire s'est réparti sur tout le profil de sol dans la BS 3. Seuls les 40 premiers cm (Ahy), qui ont été humusés après le nettoyage des tombes en 1985, étaient exempts de calcaire. Dans la BS 2, la limite du calcaire se trouvait à 74 cm, dans la BS 4 à 160 cm de profondeur.

## **Questions ouvertes**

- Peut-on établir un lien entre les valeurs maximales de température corporelle atteintes dans un cadavre enterré et les caractéristiques du sol telles que la teneur moyenne en eau ou la conductivité de l'eau ?
- Est-il possible de citer une proportion minimale de matériau terreux à gros grains, pour lequel il ne peut en général pas y avoir d'eau stagnante gênant le processus de décomposition d'un corps ?
- Dans le cadre des activités funéraires normales, les propriétés du sol peuvent-elles être modifiées de telle sorte que les conditions de décomposition du corps s'en trouvent altérées ?
- Peut-on mettre en évidence un compactage du sol (d'origine mécanique ou dû à des dépôts) sous le fond de la tombe, imputable à l'activité funéraire ?

<sup>1</sup>Flühler (1991) : p. 5-24 s.

<sup>2</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 171

<sup>3</sup>cf. Gisi (1990) : p. 103

<sup>4</sup>cf. Gisi (1990) : p. 30 s.

<sup>5</sup>Gisi (1990) : p. 28

<sup>6</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p.  
4237 communication orale Hj. Büchi<sup>8</sup>

Rubner (1912) : p. 187

<sup>9</sup>Berg (1975) : p. 91

<sup>10</sup>communication orale Peter Weidler

<sup>11</sup>Gisi (1990) : p. 92

<sup>12</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 419

<sup>13</sup>voir Sigg/Stumm (1994) : p. 386 et suiv.

<sup>14</sup>voir Sigg/Stumm (1994) : p. 390 s.

<sup>15</sup>Robert (1986) : p. 481

<sup>16</sup>cf. Robert (1986) : p. 476

<sup>17</sup>loc. cit.

<sup>18</sup>Sigg/Stumm (1994) : p. 386

<sup>19</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 378

<sup>20</sup>Robert (1986) : p. 469

<sup>21</sup>loc. cit.

<sup>22</sup>loc. cit.

<sup>23</sup>Gisi (1990) : p. 29

<sup>24</sup>cf. Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 378

<sup>25</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 378

<sup>26</sup>communication orale de Thomas Bolliger, maître-assistant à l'Institut de paléontologie de l'Université de Zurich.

<sup>27</sup>tiré de Killam (1990) : p. 63 s.

<sup>28</sup>voir Rubner (1912) : p. 197

<sup>29</sup>Rubner (1912) : p. 185

<sup>30</sup>Ottmann (1987) : p. 41

<sup>31</sup>Gerba/Bitton (1984) : p. 68

<sup>32</sup>Gerba/Bitton (1984) : p. 69 s.

<sup>33</sup>voir Cunningham (1991)

<sup>34</sup>cf. McCarty (1984) : p. 90 et suivantes ; Danielopol (1983) : p. 17 et suivantes.

<sup>35</sup>McCarty (1984) : p. 96 et suivantes.

<sup>36</sup>cf. McCarty (1984) : p. 95

<sup>37</sup>cf. McCarty (1984) : p. 96

<sup>38</sup>cf. Schlegel (1992) : p. 82

<sup>39</sup>Scheffer/Schachtschabel (1992) : p. 376

<sup>40</sup>Gisi (1990) : p. 91

<sup>41</sup>cf. Vass (1992) : p. 1244

<sup>42</sup>Fellenberg (1994) : p. 83 s.

<sup>43</sup>Entretien avec M. Etter, anthropologue, privat-docent à l'université de Bâle

<sup>44</sup>Entretien avec M. Bühl, géologue et pédologue chez Oekogeo AG, Schaffhouse



## 4. ASPECTS HYGIÉNIQUES DANS LES CIMETIÈRES F

### Résumé

Avec la mort, le risque de transmission de maladies infectieuses diminue, car un cadavre ne peut pas émettre de gouttelettes de salive (toux, éternuement) ni excréter d'excréments. L'inhumation supprime en outre l'accès direct au corps. Les germes pathogènes sont désormais tributaires d'un moyen de transport qui les remet en contact avec les humains. Une voie de transmission envisageable est le transport avec l'eau d'infiltration dans la nappe phréatique, d'où les agents pathogènes pourraient contaminer de nouvelles personnes via le captage d'eau potable.

Différentes résistances s'opposent à cette voie de propagation des germes infectieux. Dans le sol, les bactéries sont confrontées à des conditions de vie totalement différentes de celles de l'intérieur du corps. Un agent pathogène doit prouver sa capacité d'existence dans les deux conditions environnementales pour pouvoir représenter un danger. Dans les horizons minéraux du sol, les microbes manquent en outre de substances nutritives qui leur permettraient de se multiplier. Pour la plupart des bactéries, le changement de milieu et l'absence de possibilités de développement dans le sous-sol minéral entraîneront une forte réduction des populations. De plus, l'effet filtrant du matériau terreux s'oppose au transport des bactéries. L'effet de filtration augmente avec la granulométrie fine et surtout avec la teneur en argile du sol. Pour pouvoir provoquer une contamination sérieuse de la nappe phréatique, il faudrait donc que les germes pathogènes soient libérés en grand nombre par le cadavre et qu'il n'y ait qu'une couche de sol peu filtrante et de faible épaisseur entre le fond de la tombe et la nappe phréatique. Les germes pathogènes avec des formes permanentes (p. ex. les spores de l'anthrax), qui peuvent survivre pendant des décennies dans le sol, doivent être considérés séparément. La propagation d'une maladie à partir d'un cadavre correctement enterré est toutefois extrêmement improbable.

Il est peu probable que les produits de décomposition organiques aient une incidence sur les substances du sol ou des eaux souterraines. La quantité de matière organique apportée est trop faible pour cela. Une libération de mercure dissous provenant des amalgames dentaires n'est pas non plus à craindre, car l'amalgame utilisé en dentisterie s'est avéré persistant dans le sol.

## 4.1. Historique Rétrospective

A l'époque de la Réforme, ce sont encore les théologiens qui déterminaient en premier lieu les rituels funéraires et menaient des débats passionnés à ce sujet.<sup>1</sup> Avec l'entrée de la science dans le quotidien de l'homme - le "désenchantement du monde" (Max Weber) - les funérailles s'émancipèrent de plus en plus du diktat des églises. En revanche, au 18<sup>e</sup> siècle, la "police" médicale est intervenue dans le débat sur l'inhumation des morts. Deux raisons peuvent être avancées pour expliquer cette évolution :<sup>2</sup> En intégrant la mort dans l'observation critique de la nature, on découvrit le phénomène de la mort apparente. Une large phobie de l'enterrement vivant s'est répandue. Afin d'obtenir la certitude que la mort a bien eu lieu, on a introduit l'examen officiel des cadavres.<sup>3</sup> D'autre part, la "doctrine des miasmes", dont les partisans défendaient la transmission des maladies par les mauvaises odeurs et les émanations, a fait naître la peur de la contamination par les cadavres. Le récit suivant de la guerre de Crimée (1853-1856) montre à quel point les gaz des cadavres étaient considérés comme extraordinairement dangereux :<sup>4</sup>

"Ceux qui étaient récemment nos valeureux soldats en Crimée sont devenus, malgré eux, des ennemis aussi redoutables pour leurs successeurs en armes que les Russes eux-mêmes. Peu ou pas recouverts par le sol, leurs corps exhalent des miasmes pestilentiels qui tuent aussi sûrement que la poudre et le plomb et qui surpassent la fiabilité du fusil. Un évêque a bien été envoyé pour bénir les fosses où s'entassaient les cadavres, mais la contagion défie autant la bénédiction que l'eau bénite. (...) Fidèles jusqu'à la mort, comme le sont nos alliés, ils ne peuvent cependant pas l'être après la mort, même s'ils le voulaient. Ces mêmes Français qui nous ont sauvés avec leurs sabres nous empoisonnent par leur pourriture".

Le 19<sup>e</sup> siècle a apporté de profonds changements dans le domaine de l'inhumation avec le mouvement hygiéniste. Dans les années 1930, le choléra a donné lieu à de nouvelles discussions sur le déplacement des lieux de sépulture hors des centres urbains et villageois.<sup>5</sup> Dans le canton du Tessin, le grand conseil a établi par une loi que les champs de Dieu devaient être éloignés des zones habitées. La même loi prescrivait l'utilisation d'un cercueil pour "éviter l'émanation d'agents pathogènes".<sup>6</sup> Ce sont les soi-disant "hygiénistes", les prédécesseurs des médecins préventifs actuels, ainsi que les urbanistes et les technocrates qui, au XIX<sup>e</sup> siècle, ont influencé durablement les principales décisions en matière d'inhumation. Le cimetière était désormais considéré en premier lieu comme une "installation sanitaire".<sup>7</sup>

Au siècle dernier, le mode d'inhumation a fait l'objet d'un débat passionné. Les partisans de la crémation ont émis de sérieuses réserves quant à l'hygiène de la sépulture en terre. Ils craignaient que les cimetières "ne polluent le sol, l'eau et l'air de manière inquiétante et que, surtout en période d'épidémie, les cimetières ne donnent l'occasion de propager la maladie".<sup>8</sup> Le médecin Küchenmeister a poussé ces arguments encore plus loin. Il combattait la sépulture en terre parce qu'elle:<sup>9</sup>

- a. corrompt l'air du sol par les gaz de putréfaction qu'il produit et pollue directement la couche d'air de la terre la plus proche du sol dans laquelle nous vivons ; il lui apporte aussi mécaniquement des poisons infectieux moléculaires (poussière toxique) provenant de cadavres qui meurent de maladies contagieuses et se décomposent dans la terre ;
- b. parce que ces mêmes produits gazeux, dans la mesure où ils sont résorbables par l'eau, ou les sels ou lessives qui s'écoulent comme liqueur cadavérique, pénètrent dans la nappe phréatique et, avec elle, dans l'eau potable ;
- c. parce qu'il n'est pas possible de les éliminer.

... mais aussi par les germes de toxines infectieuses qu'ils emportent avec eux, ils empoisonnent les puits et donc les hommes et favorisent et provoquent la propagation des maladies infectieuses ...".

A la fin du 19e et au début du 20e siècle, l'innocuité des "gaz de Lei" a pu être démontrée. La théorie des miasmes est tombée en désuétude. Dans les cimetières, l'attention se porta de plus en plus sur la dégradation des eaux souterraines. Plusieurs études n'ont cependant pas permis de constater de pollution : "Au contraire, il n'a pas été rare de constater que la nappe phréatique des cimetières était meilleure que celle des puits peu profonds situés dans le village. Cela est compréhensible si l'on considère que les cadavres d'une localité n'apportent chaque année dans le sol qu'environ 1/70 de la quantité de substances putrescibles fournies par les vivants en tant qu'effluents (sans les eaux usées de l'exploitation) et qui, au moins dans les localités non canalisées, sont tout de même apportées très majoritairement au sol de la localité et de ses environs".<sup>10</sup>

La vision du cadavre comme foyer de maladie et source de substances nocives a cependant persisté. Au printemps 1996, on a pu s'en rendre compte à nouveau à Zurich lors de discussions sur un projet de cimetière musulman (cf. chapitre 5.4.1. Digression sur le cimetière musulman de Zurich).

## 4.2. Bactéries et Virus

Avec la mort, le risque de transmission de maladies aux autres diminue. Hermann Mooser, professeur émérite d'hygiène et de bactériologie à l'université de Zurich, avait l'habitude de transmettre ce fait aux étudiants avec des mots percutants : "Les cadavres ne représentent pas un danger de transmission de maladies infectieuses, car ils n'éternuent pas, ne toussent pas et ne chient pas !" <sup>11</sup> L'inhumation d'un mort réduit encore le risque de transmission de maladies, car le contact direct avec le cadavre est supprimé. On ne connaît aucun cas de transmission de maladie à partir d'un cadavre correctement enterré.

Les germes pathogènes présents dans les cadavres enterrés dépendent d'un moyen de transport qui les ramène à leur hôte. Pasteur supposait que les spores de l'anthrax pouvaient être transportées à la surface du sol par les vers de terre, mais Koch avait déjà démontré par des essais que cela n'était pas justifié et cela n'a jamais été confirmé par l'expérience pratique.<sup>12</sup> Une deuxième voie d'infection passe par le sol et les eaux souterraines, d'où les germes pathogènes pourraient retourner dans l'anthroposphère via un captage d'eau. Cependant, il s'agit en général d'un court-circuit entre l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées.

Sur le chemin de la nappe phréatique, deux facteurs de décimation agissent sur les agents pathogènes : D'une part, les germes meurent, d'autre part, ils sont liés à des particules de sol et sont ainsi empêchés de poursuivre leur transport. En même temps, en raison de l'absence de nutriments sous le fond de la fosse, les bactéries ne se reproduisent plus.

de la terre. Il faut donc s'attendre à une diminution continue du nombre de germes avec l'augmentation de la profondeur du sol.<sup>13</sup> Pour que le nombre de germes dans les eaux souterraines atteigne des valeurs préoccupantes, il faudrait donc que les agents pathogènes soient libérés en grand nombre. Le risque de propagation des agents pathogènes dépend donc de la quantité de germes répandus, des chances de survie sur le chemin menant à la nappe phréatique ainsi que de leur transportabilité.

#### **4.2.1. Transport de germes pathogènes à partir de Cadavres**

Dans un corps mort, la plupart des agents pathogènes ne peuvent pas se maintenir longtemps. Au cours du processus de putréfaction, ils sont affectés par des bactéries anaérobies.<sup>14</sup> Il n'a toutefois pas été possible de trouver une étude complète sur la capacité de survie des bactéries et des virus pathogènes dans les cadavres. On trouve cependant dans la littérature des indications plus précises sur les chances de survie de certains germes pathogènes :

- Selon un article récent de HEALING (1995), la probabilité que les agents pathogènes de la peste, du choléra, du typhus et de la tuberculose puissent survivre pendant une longue période dans un cadavre enterré est faible. Les anciennes fosses communes datant des années d'épidémie ne représentent donc pas un danger.<sup>15</sup>
- Dans une thèse de médecine sur la "nocivité" des cimetières datant de 1932, Hedwig Schaub fixe un cadre temporel : selon elle, la propagation de germes de maladies spécifiques (p. ex. le typhus ou la peste) est limitée dans le temps à trois ou quatre mois.<sup>16</sup>
- Les bacilles tuberculeux, bien qu'encore détectables au microscope, ne pouvaient déjà plus être cultivés après quatre semaines.<sup>17</sup>
- Un agent pathogène apparenté à la maladie de Creutzfeldt-Jakob a pu survivre à une période d'inhumation de trois ans, mais son effet infectieux a diminué d'un facteur 100.<sup>18</sup>
- Dans des conditions de laboratoire, les virus VIH ont pu survivre pendant de nombreux jours dans des tissus conservés.<sup>19</sup> En revanche, dans un cadavre enterré, il ne faut pas s'attendre à une longue durée de survie.

Les causes de décès telles que les maladies cardio-vasculaires et le cancer sont aujourd'hui devenues beaucoup plus importantes que les maladies infectieuses. Les germes fortement infectieux sont donc absents de nombreux cadavres. En revanche, on trouve dans le corps une multitude de bactéries intestinales qui sont libérées pendant la décomposition du cadavre et qui peuvent également poser un problème d'hygiène.

#### **4.2.2. Capacité de survie des agents pathogènes dans le sol**

En passant du cadavre au sol, les bactéries rencontrent des conditions environnementales totalement différentes. Un agent pathogène qui souhaite se propager d'un cadavre dans le sol doit prouver sa capacité de survie dans les deux milieux. Or, de nombreux micro-organismes sont spécialisés dans certaines conditions de vie. La rencontre de deux milieux aussi différents devrait donc constituer un obstacle insurmontable pour la propagation de nombreuses bactéries.

être un obstacle insurmontable. Les espèces capables de se transformer en une forme permanente peuvent constituer une exception (p. ex. la sporulation de l'agent pathogène du charbon, voir ci-dessous).

Pour les différentes espèces de bactéries, la durée de survie dans le sol varie fortement. Pour la plupart des bactéries intestinales pathogènes, deux à trois mois suffisent pour obtenir une réduction du nombre de germes à un niveau négligeable.<sup>20</sup> C'est ce qui ressort de différentes études menées pour évaluer le risque d'infection lors de la consommation crue d'aliments fertilisés par des engrais organiques. Elles se réfèrent donc à la couche supérieure du sol. Dans l'horizon d'ensevelissement, ces valeurs peuvent se déplacer légèrement. Les différents facteurs qui influencent la durée de survie des bactéries intestinales dans le sol sont les suivants<sup>21</sup>

**Teneur en humidité** Dans les sols humides et pendant les périodes de fortes précipitations, les temps de survie sont plus longs. Par conséquent, le temps de survie est plus court dans les sols sableux avec une faible capacité de rétention d'eau.

**Température** La durée de survie est plus longue lorsque les températures sont basses (l'auto-désinfection du sol est ralentie ou totalement interrompue) : durée de survie plus longue en hiver qu'en été (réduction de 90 % des coliformes : 3,3 jours en été, 13,4 jours en hiver). D'autre part, une alternance fréquente de gel et de dégel entraîne des lésions cellulaires.

**pH** Dans les sols acides (pH 3-5), la durée de survie est plus courte que dans les sols alcalins (influence sur la viabilité, la disponibilité de nourriture et l'activité des inhibiteurs).

**Lumière du soleil** A la surface de la terre, le temps de survie se raccourcit (le rayonnement UV a un effet bactéricide).

**matière organique** Des quantités suffisantes de matière organique prolongent la durée de survie et augmentent les possibilités de croissance.

**Concurrence par les bactéries du sol (antagonistes)** Dans les sols stériles, les temps de survie sont plus longs. Exemple d'inhibition active : les actinomycètes sont capables de réprimer la croissance de Salmonella et de bacilles dysentériques.

Les bactéries intestinales trouvent des conditions relativement favorables à la profondeur de la fosse. En raison de la grande profondeur du sol, celui-ci est souvent humide et froid en permanence, le pH est neutre ou légèrement alcalin (souvent calcaire !), il n'y a pas de lumière du soleil, mais de la matière organique est présente pendant une longue période, du moins dans la zone du cercueil. La concurrence des bactéries du sol dépend de la profondeur de l'enterrement. L'activité microbienne diminue en général avec la profondeur.<sup>22</sup>

A la profondeur de la fosse, tous les facteurs cités semblent généralement favorables aux bactéries intestinales pathogènes. Leur capacité de survie devrait donc augmenter par rapport à la surface du sol (durée de survie de 2 à 3 mois). Néanmoins, un critère très important pour la durée de vie reste l'adaptation à un environnement. Les agents pathogènes seront des bactéries mésophiles (taux de croissance maximal entre 20°C et 42°C), pour lesquelles les températures du sol sont trop froides. Mésophiles



Les bactéries devraient avoir une durée de vie maximale d'environ un an dans le monde extérieur.<sup>23</sup>

L'anthrax, dont l'agent pathogène est capable de former des spores hautement résistantes, occupe une place particulière en ce qui concerne la capacité de survie des germes pathogènes. La formation de spores ne se produit toutefois que dans des conditions aérobies. Une forte présence de spores présuppose donc qu'au moment du décès, du sang s'est écoulé du corps, dans lequel se trouvaient des bactéries correspondantes.<sup>24</sup>

Le professeur Hess, bactériologiste émérite de l'hôpital vétérinaire de Zurich, a été témoin de près d'une infection à l'anthrax. Le troupeau de vaches d'une ferme voisine a été touché. La maladie s'est déclarée après de fortes précipitations qui ont succédé à une longue période de sécheresse. Pour cette ferme, il s'agissait de la deuxième épidémie de fièvre charbonneuse. Quarante ans auparavant, un troupeau entier de vaches avait dû être abattu à cause de cette maladie. Les cadavres avaient alors été enterrés sur place. Lors de la deuxième apparition, il est possible que les spores d'anthrax aient été transportées avec l'eau d'infiltration vers le captage d'eau, d'où elles auraient pu parvenir dans l'abreuvoir des animaux.<sup>25</sup> Si cette voie d'infection était effectivement valable, cela prouverait que les spores de l'anthrax peuvent encore être infectieuses même après 40 ans. Une infection à l'anthrax chez l'homme serait néanmoins improbable, car il existe une résistance modérée à cette maladie.<sup>26</sup>

#### 4.2.3. Transport d'agents pathogènes vers Eau souterraine

Le transport des bactéries avec l'eau de percolation à travers le sol est entravé par la filtration et l'adsorption. L'effet de filtration du sol devrait être en grande partie lié à sa granulométrie. Des études menées sur des sols sableux le prouvent : l'élimination des bactéries d'un lixiviat est inversement proportionnelle à la taille des particules. En outre, la taille et la forme des micro-organismes ont également une influence sur la filtration.<sup>27</sup>

En raison de sa petite taille, de sa forme souvent plane et de sa grande surface spécifique, la fraction argileuse est une substance adsorbante idéale. L'adsorption gagne donc en importance lorsque la teneur en argile du sol augmente.<sup>28</sup> De plus, les facteurs qui favorisent l'adsorption sont ceux qui réduisent les forces de répulsion entre deux surfaces. Ces facteurs sont des concentrations élevées de cations (par ex. les cations métalliques  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  et  $Zn^{2+}$  ou encore  $NH_4^+$ ) et des valeurs de pH basses. En revanche, les composés organiques dissous peuvent entrer en compétition pour les sites d'adsorption et ainsi réduire l'adsorption des bactéries sur les particules de sol.<sup>29</sup>

Des expériences en laboratoire ont montré que la diminution de la concentration ionique dans l'eau du sol entraîne une augmentation du lessivage des bactéries.<sup>30</sup> L'adsorption s'avère donc être un processus réversible. Dans la nature, cet effet peut être observé lorsque la concentration d'ions dans l'eau du sol diminue en raison de fortes précipitations. Les bactéries et les virus adsorbés sont alors mobilisés et leur transport vers la nappe phréatique est fortement favorisé. Différentes études montrent effectivement que les plus grandes pollutions de l'eau potable (qui ne se sont pas produites dans des cimetières, il faut le souligner) sont survenues après de fortes précipitations.<sup>31</sup> Des études de la

La qualité de l'eau potable doit donc inclure des échantillons prélevés après des périodes de fortes précipitations.

En 1976 et 1977, des échantillons ont été prélevés dans les conduites de drainage de tous les grands cimetières de Zurich et analysés selon les paramètres bactériologiques habituels.<sup>32</sup> A titre de référence, des échantillons ont également été prélevés dans des conduites de drainage situées en dehors de la zone d'alimentation des tombes. Au cimetière de Fluntern, les échantillons de référence ont tous donné des valeurs nettement plus mauvaises. Les valeurs du cimetière d'Albisrieden permettent également de conclure que d'autres facteurs entraînent une plus forte pollution de la nappe phréatique que l'activité d'inhumation : ici, les bactéries fécales (*E. coli*, *entérocoques*) étaient surtout très nombreuses, bien que le cimetière ne soit plus que rarement occupé par de nouvelles tombes. Le service d'assainissement de la ville de Zurich a tiré les conclusions suivantes des résultats des mesures :

"D'un point de vue général, la pollution des eaux publiques par les eaux d'infiltration des cimetières peut être négligée, et ce pour les raisons suivantes :

- De nombreuses conduites d'infiltration sont déjà raccordées au réseau d'eaux usées.
- Dans aucun des lixiviats qui sont directement déversés dans les eaux publiques, on n'a trouvé des valeurs supérieures à celles prescrites par l'Ordonnance cantonale sur les eaux de baignade. L'ordonnance sur l'hygiène générale et l'hygiène de l'habitat prescrit pour les eaux de baignade (max. 10'000 coliformes et 100 entérocoques dans 100 ml). On pourrait donc se baigner sans problème dans les eaux d'infiltration (pour autant qu'il y ait suffisamment d'eau) sans prendre de risques pour la santé.
- Comme les lixiviats sont encore fortement dilués après avoir été déversés dans un cours d'eau, il ne faut s'attendre à aucun effet négatif".

Dans cette étude, on a malheureusement supposé que de fortes pluies le jour de l'échantillonnage entraîneraient une dilution indésirable du nombre de bactéries, raison pour laquelle on a renoncé à prélever des échantillons dans de telles conditions météorologiques. En réalité, il semble que ce soient justement les fortes précipitations qui contribuent à une mobilisation accrue des bactéries (voir ci-dessus). Ceci devrait être pris en compte lors d'études ultérieures.

Une étude approfondie des agents pathogènes n'était pas envisageable en raison du temps limité à disposition. L'étude des voies de transmission des différents agents pathogènes permettrait d'évaluer plus précisément quelles maladies présentent un risque potentiel de contagion. L'ouvrage "Control of Communicable Diseases in Man", publié par l'Association américaine de santé publique, pourrait être d'une grande utilité pour ce travail. Pour chaque maladie transmissible, le mode de transmission y est décrit. (Une nouvelle édition est publiée tous les deux ans).

### **4.3. Atteinte par les produits de dégradation organiques**

Pour évaluer la nocivité d'une pollution matérielle, il convient de comparer la qualité (par ex. toxicité, dégradabilité) et la quantité de l'apport. Pour

Dans le cas de la décomposition des cadavres, c'est surtout le liquide de putréfaction qui constitue un apport de substances dans le sol (cf. chapitre 1.3. Putréfaction et décomposition), sachant qu'en raison du substrat de départ, le "liquide cadavérique" contient principalement des catabolites protéiques et des acides gras hydrosolubles. Dans la littérature, les produits de dégradation sont mentionnés à différents endroits,<sup>33</sup> mais en général sans indication de quantité. Il n'existe cependant pas de composition exacte des substances contenues dans le "liquide cadavérique". Une liste des produits de dégradation trouvés dans la littérature figure à l'annexe C.

#### **4.3.1. Toxicité des Catabolites cadavériques**

Pour pouvoir se prononcer sur l'écotoxicité des produits de dégradation, il faudrait disposer de données quantitatives sur les catabolites libérés. Celles-ci ne sont en grande partie pas disponibles. Comme il s'agit de la dégradation d'un corps organique - un processus qui se déroule en permanence dans la nature - il ne faut pas s'attendre à une atteinte toxicologique de l'écosystème du sol. La situation est légèrement différente en cas de lessivage des catabolites dans les eaux souterraines. En tant que source de nutriments et d'énergie, les composés organiques peuvent entraîner une augmentation de l'activité microbienne dans l'aquifère. Cette consommation supplémentaire d'oxygène peut avoir un effet destructeur sur l'intégrité biologique de la biocénose locale.<sup>34</sup> Le sol, en tant que filtre, s'oppose toutefois à une dégradation de l'aquifère, et les apports de substances organiques dans le cimetière doivent être considérés comme très faibles (cf. chapitre 4.3.3. Comparaisons quantitatives). En cas d'examen minutieux de la toxicité, il conviendrait de s'intéresser en premier lieu aux composés de type alcaloïde qui se forment lors de la dégradation des protéines.<sup>35</sup>

#### **4.3.2. Transport des Catabolites cadavériques**

La transportabilité d'un composé organique dans le sol dépend en grande partie de sa répartition entre la phase solide (particules de sol) et l'eau.<sup>36</sup> Les composés bien solubles dans l'eau sont donc généralement mieux et plus rapidement transférés que les substances lipophiles. Toutefois, les substances hydrosolubles se révèlent souvent bien dégradables, ce qui est lié à leur libre accès par les micro-organismes. Il n'existe toutefois pas de données empiriques sur le transfert des catabolites cadavériques.

#### **4.3.3. Comparaisons quantitatives**

Dans le chapitre "Décomposition humaine", le tableau 1.2 présente la composition chimique d'un cadavre. Ces données permettent de calculer un poids sec d'un peu moins de 25 kg pour le corps en question. (Ailleurs, on admet que le poids sec du corps humain n'est que de 14 kg.<sup>37</sup>). Pour obtenir le poids sec des tissus mous, il faut déduire de ces 25 kg le poids sec du squelette, ce qui donne une valeur d'un peu plus de 14 kg. Pour une surface de tombe supposée de 2 mètres carrés et une fréquence d'occupation de 20 ans, cela donne pour le corps considéré environ 350 grammes de matière organique sèche par m<sup>2</sup> et par an. Si l'occupation totale de la surface

d'un cimetière, qui est en moyenne d'environ 10 mètres carrés par tombe,<sup>38</sup> , il en résulte environ 70 grammes de matière organique sèche par m<sup>2</sup> et par an. A titre de comparaison, la productivité primaire nette d'une forêt de feuillus à feuilles caduques (Klimaxvegetation du Plateau suisse). Celle-ci s'élève en moyenne à environ 1'000 grammes de matière sèche par m<sup>2</sup> et par an.<sup>39</sup>

En 1983, 1'350 inhumations ont eu lieu dans les cimetières municipaux de Zurich.<sup>40</sup> Cela correspond à une estimation de 18'900 kg de poids sec de tissus organiques. En divisant ce chiffre par la surface totale des cimetières de la ville (125,25 hectares)<sup>41</sup> , on obtient pour 1983 environ 15 grammes de matière organique sèche par m<sup>2</sup>. D'autre part, un être humain rejette environ 45 kg de fèces par an.<sup>42</sup> En déduisant la teneur en eau, cela correspond à un poids sec d'environ 8,5 kg.<sup>i</sup> En multipliant ce chiffre par la population résidente de Zurich (qui était d'environ 369 500 habitants en 1980)<sup>43</sup> , on obtient un poids total de 3 140 750 kg de poids sec de fèces rejetées. Sa répartition sur l'ensemble des espaces verts de la ville (4'224 hectares ; sans compter les jardins familiaux, qui sont comptés comme surface d'habitat)<sup>44</sup> donne 74 grammes de poids sec de fèces par m<sup>2</sup> et par an. Si l'on calcule sur l'ensemble de la surface urbaine (8'772 hectares)<sup>45</sup> , on obtient à peine 36 grammes de poids sec de fèces par m<sup>2</sup> et par an.

Ces chiffres doivent être considérés comme une estimation grossière des ordres de grandeur. Les chiffres ci-dessus ne peuvent pas non plus être comparés directement entre eux, car la matière organique est composée différemment et se trouve à différents endroits. Une comparaison entre les 15 grammes de tissus mous secs et les 1'000 grammes de matière sèche d'une forêt de feuillus verte en été montre toutefois qu'il ne s'agit pas, à l'échelle de la nature, d'apports importants pour les cadavres.

#### 4.4. Apport de Mercure

Le mercure présent dans le corps humain provient principalement des amalgames dentaires. La proportion dans le reste du corps est négligeable. Outre le mercure, l'amalgame dentaire contient d'autres métaux comme le sodium, le plomb, le zinc, l'or et l'argent.<sup>46</sup> À partir de 200°C, l'amalgame commence à se décomposer et à partir de 700°C, cette décomposition est complète. En comparaison, les températures dans le four de crémation se situent entre 800 et 1 200°C. Lors de la crémation, la plus grande partie du mercure s'évapore donc et est rejetée dans l'environnement par les cheminées. Dans les environs des crématoriums, il en résulte une pollution mesurable à petite échelle et une pollution de base du sol par le mercure, non mesurable, à grande échelle.<sup>47</sup>

La libération de mercure lors de la crémation soulève la question de son devenir lors de l'inhumation. Il s'agit tout de même d'une quantité moyenne de mercure de  $2,49 \pm 0,37$  grammes par personne décédée.<sup>48</sup> L'article de VAN WYK (1990) décrit des amalgames provenant de corps exhumés il y a plus de 100 ans.

---

<sup>i</sup> En moyenne, 100 ml d'eau sont rejetés chaque jour par les fèces (cf. Schmidt, 1969 : p. 203). Sur une année, cela représente 36,5 kg d'eau. Le poids sec s'obtient ensuite en soustrayant l'eau du poids frais des matières fécales.

ont été enterrés. L'amalgame s'est alors révélé encore brillant et dur. Seuls les deux plus anciens amalgames trouvés étaient cassants et noirs.<sup>49</sup> Ce phénomène est lié à l'amalgame utilisé. Avant 1850, on utilisait encore un amalgame de moindre qualité, alors que depuis 1855, les compositions des produits sont comparables à celles utilisées aujourd'hui.<sup>50</sup> Sur la base de ces résultats, on peut donc supposer que les amalgames dentaires sont très persistants par rapport à une dissolution dans le sol. Il n'y a donc pas lieu de craindre une contamination par le mercure dissous.

## Questions ouvertes

- Existe-t-il des micro-organismes capables de survivre à la fois dans le milieu d'un corps mort et dans le sol ?
- Quel est l'ordre de grandeur de la distance de dissémination de différents agents pathogènes dans le sous-sol minéral, calculée à partir de la durée de survie moyenne et de la vitesse de transport moyenne ?
- Sur quelle couche de sol peut-on constater une contamination de l'eau du sol par des composés organiques dissous en dessous du fond de la tombe ?
- Jusqu'à quelle profondeur du sol, en dessous du fond de la tombe, la composition inorganique de l'eau du sol change-t-elle ?
- Sur quelles périodes après l'inhumation s'étendent les préjudices mentionnés ?

---

<sup>1</sup>Illi (1992) : p. 137

<sup>2</sup>loc. cit.

<sup>3</sup>voir Rubner (1912) : p. 169

<sup>4</sup>Thalmann (1978), p. 23

<sup>5</sup>Hauser (1994) : p. 128

<sup>6</sup>loc. cit.

<sup>7</sup>Illi (1992) : p. 137 s.

<sup>8</sup>d'une encyclopédie médicale de 1881. Source : Thalmann (1978) : p. 20

<sup>9</sup>Thalmann (1978) : p. 19

<sup>10</sup>Rubner (1912) : 192

<sup>11</sup>Tiré d'un article de journal de Charles Inwyler, mis à disposition par le service des pompes funèbres de Zurich. Malheureusement, aucune date de publication n'est visible. Cette déclaration a été transmise au journaliste par Meinrad Schär, le successeur du professeur Mooser.

<sup>12</sup>Rubner (1912) : p. 194

<sup>13</sup>voir Borneff/Borneff (1991) : p. 131 et s.

<sup>14</sup>Article de journal de Charles Inwyler (cf. note de bas de page ci-dessus)

<sup>15</sup>Healing (1995) : p. R63

<sup>16</sup>Hedwig Schaub : Zur Geschichte des Bestattungswesens in Basel, Diss. Bâle, Liestal 1933. Cité dans Illi (1992) : p. 178 (note de bas de page 3)

<sup>17</sup>Berg (1975) : p. 68

<sup>18</sup>Healing (1995) : p. R65

<sup>19</sup>loc. cit.

<sup>20</sup>Gerba/Bitton (1984) : p. 71

<sup>21</sup>cf. Gerba, Bitton (1984) : p. 71, complété par des données des p. 72 s.

<sup>22</sup>voir Brock (1994) : p. 641 ; Borneff/Borneff (1991) : p. 132

<sup>23</sup>voir Borneff/Borneff (1991) : p. 131

<sup>24</sup>Healing (1995) : p. R64

<sup>25</sup>d'après une communication orale de M. Etter, anthropologue à l'Université de Bâle

<sup>26</sup>Healing (1995) : p. R64

<sup>27</sup>cf. Gerba/Bitton : p. 68<sup>28</sup>

Gerba/Bitton : p. 68 s.

<sup>29</sup>Gerba/Bitton : S. 69

<sup>30</sup>Gerba/Bitton : S. 70

<sup>31</sup>Gerba/Bitton : S. 67

<sup>32</sup>Les résultats ont été mis à ma disposition par le service d'assainissement de la ville de Zurich, et je l'en remercie.

<sup>33</sup>p.ex. Schmidt (1969) : p. 193, 217 f, 226 f ; Berg (1975) : p. 69-71 ; Daldrup (1978) ; Coe (1974)

<sup>34</sup>cf. Danielopol (1983) : p. 21

<sup>35</sup>cf. Schmidt (1969) : p. 226

<sup>36</sup>voir Schwarzenbach (1993) : p. 255 et suivantes.

<sup>37</sup>cf. Berg (1975) : p. 88

<sup>38</sup>cf. Ottmann (1987) : p. 45

<sup>39</sup>Kuttler (1995) : p. 363

<sup>40</sup>tiré des documents du séminaire sur les cimetières zurichois du Prof. Dr Paul Hugger

<sup>41</sup>loc. cit.

<sup>42</sup>Baccini (1992) : p. 58<sup>43</sup>

Annuaire statistique op. cit.<sup>44</sup>

<sup>45</sup>loc. cit.

<sup>46</sup>cf. tiré à part de L'environnement pratique, n° 4/1995 : p. 2

<sup>47</sup>loc. cit.

<sup>48</sup>Tiré à part de L'environnement pratique, n° 4/1995 : p. 1

<sup>49</sup>van Wyk (1990) : p. 22

<sup>50</sup>van Wyk (1990) : p. 27

## 5. M A C T I O N S

### **Résumé**

En règle générale, la profondeur d'inhumation est aujourd'hui trop importante, ce qui peut avoir des répercussions négatives sur le processus de décomposition. Une profondeur d'inhumation plus faible permettrait d'améliorer les conditions de décomposition du corps dans de nombreux endroits, sans que l'on doive pour autant craindre des émissions d'odeurs ou des profanations de tombes par des animaux.

D'autres mesures concernent les plantations du cimetière ainsi que le choix du cercueil et des vêtements mortuaires. Tant le bois du cercueil que les matériaux des vêtements doivent être facilement dégradables afin de ne pas entraver le processus de décomposition. Pour la construction du cercueil, il est par exemple recommandé d'utiliser du bois de sapin, qui doit idéalement être laissé sans traitement. Les chemises amples et légères en coton conviennent bien pour les vêtements mortuaires. Les fibres synthétiques sont à proscrire. Lors de l'aménagement du cimetière, il faut tenir compte des plantes à racines profondes qui peuvent contribuer au drainage de l'espace funéraire.

La mesure la plus importante consiste toutefois à choisir soigneusement le site, en prenant également en compte le sol comme critère. Aucun phénomène d'engorgement ne devrait se produire dans la couche de sol située sous le fond de la tombe prévue, ni être provoqué par de petits processus d'enfouissement et d'imperméabilisation du sol. En outre, une distance de sécurité doit être respectée par rapport au niveau le plus élevé de la nappe phréatique pouvant être atteint au cours de l'année.

## 5.1. Choix du terrain

Pendant longtemps, il était courant qu'un cimetière soit situé autour de l'église. Aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, on a en revanche cherché à déplacer les cimetières hors du centre des localités pour des raisons d'hygiène (cf. chap. 4.1. Rétrospective historique). Dans d'autres endroits, l'exclusion des cimetières s'est faite par manque de place. L'augmentation de la population des villages et des villes nécessitait également une extension de la surface des cimetières.<sup>1</sup> Cependant, il n'y avait souvent plus de place dans les centres des localités.

La séparation d'un cimetière présente des avantages et des inconvénients. Pour les personnes âgées en particulier, l'un des inconvénients est que l'emplacement du cimetière est moins central. En revanche, le choix de l'emplacement peut se baser sur des critères objectifs. Un cimetière doit

- notamment pour les personnes âgées. Si la distance jusqu'au centre de la localité est importante, l'accès par les transports publics doit être garanti. En tant que lieu de silence, le cimetière devrait en outre être construit sur un terrain aussi éloigné que possible des sources de bruit telles que les voies de circulation très fréquentées. Pour permettre une bonne décomposition des corps, le troisième critère à prendre en compte est l'adéquation du sol et du sous-sol géologique. Dans ce contexte, il convient d'accorder une attention particulière à la couche de terre qui s'étend sous le fond de la tombe prévue. Dans cette zone de sol, il ne devrait pas y avoir de phénomènes d'humidification ou de petits processus d'enfouissement et de compactage du sol. Pour le matériau de terre, il faut donc exiger une certaine proportion de matériau à gros grains. En raison du manque de données, il n'est pas possible de donner des indications quantitatives.

Les eaux souterraines ont le même effet inhibiteur sur la décomposition que les eaux de retenue. De plus, il y a lieu d'émettre des réserves sur le plan de l'hygiène, surtout si un captage d'eau superficiel est situé en aval du cimetière. Il est donc conseillé de veiller, lors du choix du terrain, à ce qu'il y ait une distance de sécurité entre le fond de la tombe et le niveau le plus élevé de la nappe phréatique. Le but de cette distance de sécurité est d'adsorber les germes et les composés organiques qui s'infiltrent dans le sol avec le liquide mortuaire. L'épaisseur de cette couche de sol dépend de la vitesse d'infiltration et de la capacité d'adsorption et varie selon la nature du sol. Hormis dans un livre d'hygiène datant de 1912, aucune proposition n'a pu être trouvée concernant la taille de la distance de sécurité entre le fond de la tombe et le niveau le plus élevé de la nappe phréatique. Dans le livre d'hygiène précité, on peut lire : "Cette couche est suffisamment dimensionnée à 50 cm pour un sol bien filtrant, compte tenu du fait que les bactéries sont déjà retenues dans les 10 premiers cm sous le fond de la tombe".<sup>1</sup> La distance de sécurité de 50 cm proposée semble toutefois un peu courte. Il faut surtout se demander si un sol bien filtrant peut retenir les bactéries dans les dix premiers centimètres. Il est extrêmement difficile de tirer des conclusions générales sur l'adsorption des bactéries sur les particules de sol, car les types de bactéries peuvent être très différents les uns des autres.<sup>2</sup> De plus, en plus des bactéries, l'élagage est également un facteur important.

Les composés organiques doivent être pris en compte dans l'évaluation de la qualité de l'eau.

La distance de sécurité de 2,5 mètres par rapport au niveau de la nappe phréatique, prescrite pour tout prélèvement de matériaux dans le sol, peut servir de valeur de comparaison.

<sup>1</sup> Selon le professeur Paul Hugger, il faut compter en moyenne 1,8 à 2,2 mètres carrés par habitant. Selon Ottmann (1987, p. 46), la même valeur est de 5 à 7 mètres carrés.



sont à l'intérieur.<sup>3</sup> Cette distance doit garantir que la contamination de la nappe phréatique par l'essence ou l'huile déversée puisse être évitée. Dans les cimetières, il s'agit toutefois d'un potentiel de risque pour les eaux souterraines beaucoup plus faible. Une distance de sécurité raisonnable se situe donc entre les valeurs discutées de 0,5 et 2,5 mètres.

Une contamination de l'eau souterraine par des micro-organismes ou des composés organiques ne constitue pas encore un risque d'infection. Ce n'est qu'en présence d'une source d'eau proche que des risques sanitaires sont à craindre. Afin d'exclure largement ce risque, les cimetières ne devraient pas toucher la zone de protection 1 des captages d'eau.<sup>4</sup>

La question du choix du terrain sera abordée plus en détail dans un travail de diplôme à l'Institut de géologie de l'Université de Berne (Prof. Ch. Schlüchter). Achèvement prévu de ce travail : printemps 1998.

## 5.2. Profondeur d'inhumation

Alors que l'emplacement du terrain du cimetière est en général déjà prédéfini, la profondeur d'inhumation peut varier dans une certaine mesure. La couche de terre recouvrant le cercueil doit alors pouvoir garantir la suppression des émissions d'odeurs sur le terrain du cimetière et une protection contre les profanations de tombes par des vertébrés nécrophages. Or, selon le livre de l'hygiène de 1912, l'effet adsorbant du sol est si important que "l'expérience montre qu'un faible recouvrement des cercueils par de la terre exclut déjà toute nuisance olfactive".<sup>5</sup>

Différents insectes nécrophages, qui possèdent un système olfactif très développé pour les gaz de décomposition (p. ex. les mouches des familles des Sarcophagidés et des Calliphoridés), peuvent servir d'indicateurs d'une profondeur d'inhumation insuffisante. Sur des corps enterrés sans cercueil, on a pu observer qu'à une profondeur de fond de tombe de 0,3 mètre, il y avait une présence accrue d'insectes nécrophages à la surface du sol. Après de fortes précipitations, on a également constaté que certaines mouches tentaient de se frayer un chemin vers le corps à travers de petites fentes et fissures dans le sol, et que des mouches femelles déposaient leurs œufs sur ces sites funéraires dans la terre humide. Pour une profondeur d'inhumation de 0,6 mètre, aucune anomalie n'a été signalée en ce qui concerne l'activité des insectes.<sup>6</sup> Cette observation isolée donne une indication sur l'épaisseur minimale que doit avoir une couche de sol au-dessus du couvercle du cercueil. Il convient toutefois de noter que l'effet d'adsorption des gaz de décomposition varie d'un sol à l'autre. L'efficacité de l'élimination des émissions d'odeurs dépend en grande partie de la composition du matériau terreux. L'effet adsorbant de la terre devrait augmenter avec la finesse de la granulométrie et surtout avec l'augmentation de la teneur en humus.

L'inhumation doit avoir lieu à une profondeur qui ne permette pas une concentration perceptible des gaz de putréfaction à la surface de la tombe, tant pour l'homme que pour les animaux nécrophages. Une trop grande profondeur d'inhumation est par contre à éviter, car elle se répercute sur l'environnement.

a généralement un effet ralentissant sur la décomposition du corps.<sup>7</sup> Il y a plusieurs raisons à cela :

- Les variations saisonnières de la température du sol diminuent avec l'augmentation de la profondeur d'ensevelissement, la température du sol se stabilisant à un niveau bas<sup>8</sup> (cf. chap. 3.1. Température du sol).
- Le taux d'échange de gaz diminue avec la profondeur du sol, ce qui fait que l'oxygène n'est plus apporté que dans une moindre mesure.
- Plus la profondeur d'inhumation est importante, plus la densité du dépôt augmente, ce qui tend à réduire la conductivité de l'eau. Si la couche de sol adjacente au fond de la tombe présente une faible perméabilité à l'eau, il faut prendre en considération un risque accru de formation de zones d'accumulation par compactage du sol (cf. chap. 3.3. Conditions de décomposition dans différents sols).
- Les racines des plantes évacuent l'eau du sol et ont ainsi un effet positif sur le drainage d'une zone du sol. C'est pourquoi il est préférable que le cercueil soit placé dans une zone où les racines peuvent pénétrer. Cela nécessite un sol profond ainsi qu'un choix de plantes adapté dans le cimetière (cf. chapitre 5.3. Plantations dans le cimetière).
- La présence d'insectes diminue également avec la profondeur du sol, leurs larves pouvant accélérer fortement la décomposition des cadavres (cf. chap. 1.4.1. Insectes).
- Si les processus structurants du sol s'étendent jusqu'en dessous du fond de la tombe, les éventuels phénomènes de compactage du fond de la tombe peuvent ainsi être partiellement réduits. Ce point serait intéressant si la formation de zones d'accumulation pour certains types de sol devait effectivement être confirmée (cf. chapitre 3.4. Effets de l'activité du cimetière sur le sol). Une réduction de la profondeur d'inhumation serait alors également bienvenue pour des raisons de réversibilité partielle du tassement du sol et donc de prolongation de la durée d'utilisation d'un cimetière.

La profondeur d'inhumation a connu une évolution considérable au fil du temps. Au Münsterhof de Zurich<sup>9</sup>, les enterrements ont eu lieu à partir de la deuxième moitié du 9e siècle pendant environ quatre générations dans des fosses d'environ 50 cm de profondeur. Vers l'an 1000, les corps étaient souvent mis en bière dans de simples caisses en bois. La profondeur d'inhumation s'est alors accrue jusqu'à près d'un mètre. Après l'an 1000, les inhumations ont de nouveau eu lieu dans de simples fosses de moins de 50 cm d'épaisseur. Dans le champ de tombes du "Runden Büchel" à Balzers, également datant du début du Moyen Âge, la profondeur d'inhumation était d'environ 50 cm, souvent de 30 à 40 cm seulement pour les tombes simples en terre.<sup>10</sup>

Le premier règlement des fossoyeurs dans les registres de la ville de Zurich, datant de 1316, exigeait une distance minimale d'une coudée entre le couvercle du cercueil et la surface de la terre. Les conseils de Berne, de Bâle et de Soleure ont édicté des dispositions similaires. L'acte de fondation d'Esslingen mentionne quant à lui une profondeur minimale d'environ 2 mètres jusqu'au fond de la tombe. Les mêmes dimensions minimales strictes étaient également en vigueur à Nuremberg en 1450.<sup>11</sup> Les tombes de la fin du Moyen Âge ne dépassaient généralement pas la profondeur de la hanche.<sup>12</sup>

La participation accrue de la "police" médicale dans le domaine de l'inhumation (18e siècle), mais surtout le mouvement hygiéniste du 19e siècle, ont également eu des répercussions sur la profondeur de l'inhumation (cf. chap. 4.1. Rétrospective historique). La doctrine médicale de l'époque voyait dans la lutte contre les odeurs une mesure efficace de lutte contre les épidémies.<sup>13</sup> Par crainte des "miasmes", une réglementation officielle s'imposait.

<sup>i</sup> Au Moyen Âge, une coudée mesurait entre 40 et 75 cm.

La profondeur d'inhumation, habituellement fixée entre 1,5 et 2 mètres, a été réglementée par la loi.<sup>14</sup>

Depuis le début du siècle, les connaissances sur la transmission de maladies par des micro-organismes et donc sur la voie d'infection par l'eau se sont imposées. Depuis, on sait que les gaz de putréfaction qui s'échappent ne représentent pas un danger potentiel pour la santé, mais que des problèmes d'hygiène dans les eaux souterraines sont au moins envisageables. Ce savoir n'a cependant pas eu d'effet sur la profondeur d'ensevelissement. Aujourd'hui encore, les profondeurs d'inhumation fixées à l'époque de la "théorie des miasmes" sont respectées en de nombreux endroits. Cela pourrait être lié au désintérêt des sciences naturelles pour le domaine funéraire. Mais ce n'est pas tout : Max Josef von Pettenkofer (1818-1901), l'un des représentants les plus respectés et les plus véhéments de la "théorie des miasmes", considérait déjà une profondeur d'inhumation de 1,2 mètre comme généralement suffisante.<sup>15</sup> Convaincu que les gaz de putréfaction peuvent être porteurs de maladies et de mort, Pettenkofer exigeait donc une profondeur d'inhumation inférieure à celle qui est souvent pratiquée aujourd'hui !

Une profondeur de la semelle de la tombe de 0,9 à 1,2 mètre devrait être acceptable sans qu'il faille craindre des effets négatifs tels que des émissions d'odeurs sur le terrain du cimetière ou des profanations de tombes par des animaux. Dans les cimetières rénovés par l'entreprise Tony Linder + Partner AG, une profondeur de semelle de 1,2 mètre est la règle (voir ci-dessous). RUBNER (1912) rapporte qu'à Hambourg, on pratiquait même une profondeur d'inhumation d'un mètre seulement pour les tombes en ligne.<sup>16</sup> En cas de troubles de la décomposition, une réduction supplémentaire de la profondeur d'inhumation peut donc être envisagée.

L'augmentation de la profondeur d'inhumation offre donc la possibilité d'obtenir une amélioration des conditions de décomposition avec moins de travail. Ceci est particulièrement recommandé en cas de troubles de la décomposition des corps (conservation des acides gras). Le deuxième effet est l'augmentation de la distance par rapport à la nappe phréatique. La réduction de la profondeur d'inhumation ne doit cependant pas être considérée ou exigée comme une mesure de protection de la nappe phréatique. Une distance de sécurité par rapport à la nappe phréatique dans la zone susmentionnée peut être respectée en de nombreux endroits, même avec une profondeur de fond de tombe de deux mètres.

La "sépulture à étages" n'est pas recommandée. Dans ce cas, les restes du cercueil et du corps enterré en premier sont laissés dans la tombe, recouverts d'une petite couche de terre. On procède ensuite à une nouvelle inhumation.<sup>17</sup> Cela implique des profondeurs d'inhumation inutilement importantes pour les premières inhumations. Les performances de décomposition ainsi détériorées peuvent se manifester par une apparition accrue de corps conservés par des acides gras. De plus, le nombre d'occupations de tombes est dès le départ fortement limité.

### **5.3. Plantation de cimetière**

Pour que la végétation puisse contribuer au drainage de l'espace funéraire, il faut tenir compte des plantes à racines profondes dans l'aménagement du cimetière. La Direction de la santé du canton d'Uri recommande de planter des pins sur les tombes.

ou d'autres petits conifères. Selon la même source, les conifères tels que les pins et les sapins conviennent bien à la plantation des bords des tombes, afin de favoriser la décomposition des corps.<sup>18</sup>

Dans l'idéal, l'aménagement d'un cimetière n'est pas seulement fonctionnel et esthétique. En raison de leur situation généralement calme, les cimetières sont également prédestinés à devenir des surfaces de compensation écologique. L'utilisation de plantes indigènes bien adaptées permet d'offrir au monde animal un espace vital dont il a un besoin urgent. Le "Gottes acker", parc de découverte de la nature, est déjà mis en œuvre de manière attrayante dans de nombreux cimetières zurichois. Il faut espérer que cette voie sera suivie dans la ville de Zurich et qu'elle fera des émules ailleurs.

## 5.4. Cercueil

Selon MANT, l'utilisation d'un cercueil facilite clairement la décomposition du corps.<sup>19</sup> Mant a fait ces observations lors d'exhumations qu'il a effectuées après la Seconde Guerre mondiale en Allemagne et donc dans des sols plutôt humides. L'effet du cercueil est dû à l'isolement de l'eau du sol et à l'existence d'un espace d'air autour du corps. Cette observation n'est toutefois pas forcément valable pour les sols plutôt secs.

Le cercueil est surtout utile pendant la phase de putréfaction de la décomposition du corps. Après la déshydratation du corps et avec l'importance croissante des processus de décomposition aérobies (phase de décomposition), la fermeture étanche du cercueil vers le sol a plutôt tendance à empêcher la décomposition. Il faut donc veiller à la dégradabilité du matériau utilisé pour le cercueil. Le sapin, par exemple, se décompose relativement facilement et convient donc bien. En revanche, le bois de chêne est à éviter. Dans le sol, il est extrêmement résistant à la dégradation. Dans un sol toujours humide, le bois de chêne se conserve en moyenne 700 ans, et même 1800 ans dans un sol très sec. En cas d'humidité variable, la durabilité moyenne du bois de chêne est de 120 ans.<sup>20</sup>

Afin d'obtenir une bonne décomposition et une charge supplémentaire aussi faible que possible du sol par le cercueil, le bois doit être laissé sans traitement. Il faut notamment éviter d'utiliser des produits de protection du bois. Si des peintures pour bois sont tout de même utilisées, elles doivent être facilement dégradables sans laisser de résidus. Cela vaut également pour les produits auxiliaires utilisés lors de la fabrication des cercueils (p. ex. les colles) et pour le revêtement intérieur des cercueils.

Il est recommandé de prescrire l'utilisation de cercueils imputrescibles dans les règlements des cimetières.<sup>21</sup>

### 5.4.1. Digression sur le cimetière musulman à Zurich

Dans le cadre d'un projet de cimetière musulman, une discussion émotionnelle a éclaté au printemps 1996 dans le quartier concerné de la ville de Zurich sur l'hygiène des enterrements en tissu, tels qu'ils sont prévus par les règles funéraires de l'Islam. Drap-

Les enterrements semblent déconcertants pour de nombreux Européens. L'enfouissement sans cercueil du corps dans la terre suscite des craintes de contamination du sol et de l'eau. Pourtant, les enterrements en cercueil ont longtemps été l'exception, même dans notre culture. Ce n'est qu'au

Aux 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles, on assiste à un net déplacement en faveur de l'"arbre des morts".<sup>22</sup> Il faut voir dans la "police" médicale l'auteur de cette évolution, qui cherchait à empêcher la propagation des "miasmes" par l'utilisation généralisée du cercueil.

Dans notre culture, un corps mort est souvent associé au "poison du cadavre" et à des agents pathogènes dangereux. Les médecins préventifs ne partagent pas ces craintes. Au contraire, les cadavres sont considérés comme plutôt inoffensifs.<sup>23</sup> C'est encore plus vrai pour les cadavres enterrés (voir le chapitre sur l'hygiène). Sauf circonstances extrêmement défavorables (niveau élevé de la nappe phréatique, grande conductivité de l'eau dans le sol et captage d'eau à proximité en aval), les risques sanitaires proviennent plus de l'imagination humaine que du cadavre.

Dans les sols humides, on peut attribuer au cercueil un effet favorisant la décomposition. En revanche, dans le cas d'une inhumation en toile, il faut s'attendre à une plus forte tendance à la conservation des acides gras. Le choix d'un terrain approprié et d'une profondeur d'inhumation raisonnable, ainsi qu'éventuellement l'ajout de matériaux végétaux sur le fond de la tombe (voir ci-dessous), permettent de réduire la probabilité de troubles de la décomposition. En outre, il convient de souligner que les corps conservés avec des acides gras ne présentent pas de risque hygiénique accru. Dans un cimetière bien entretenu, il n'y a pas lieu de craindre pour la sécurité, même en cas d'inhumation en tissu.

## **5.5. Vêtements mortuaires**

Les vêtements portés par les cadavres doivent être légers et facilement dégradables. Il est particulièrement recommandé de se limiter à une chemise mortuaire spéciale en matériau facilement décomposable.<sup>24</sup> Les vêtements légers en coton sont bien adaptés. Les vêtements moulants tels que les sous-vêtements et les chaussettes, qui favorisent la formation d'adipocire, ne sont pas adaptés. Le nylon et les autres fibres synthétiques sont également à proscrire, car ils peuvent fortement entraver le processus de décomposition. Les combinaisons entières devraient également être évitées.<sup>25</sup>

Dans les règlements des cimetières, il est recommandé de prescrire l'utilisation de tissus vestimentaires rapidement dégradables.<sup>26</sup>

## **5.6. Décomposition accélérée grâce au matériau de remplissage végétal**

Selon les observations de terrain, la présence de matière végétale autour du corps accélère la décomposition du cadavre (cf. chap. 2.5.6. Matière végétale). Les raisons invoquées sont les suivantes

l'effet d'isolant thermique et la libération de chaleur lors de la décomposition. Ces propriétés sont principalement attribuées à la paille, mais aussi aux branches de conifères et aux copeaux de bois. Ces derniers étaient souvent placés sur le fond du cercueil afin de retenir les fluides corporels qui s'échappaient du corps. En raison de sa faible surface spécifique, le bois de cercueil ne contribue que dans une mesure limitée à cet effet.

La propriété de la matière végétale à favoriser la décomposition devrait être vérifiée expérimentalement. Si l'effet est confirmé, il est possible d'envisager l'introduction de matière organique dans le cercueil en cas d'apparition de troubles de la décomposition.

## 5.7. Rénovations de cimetières

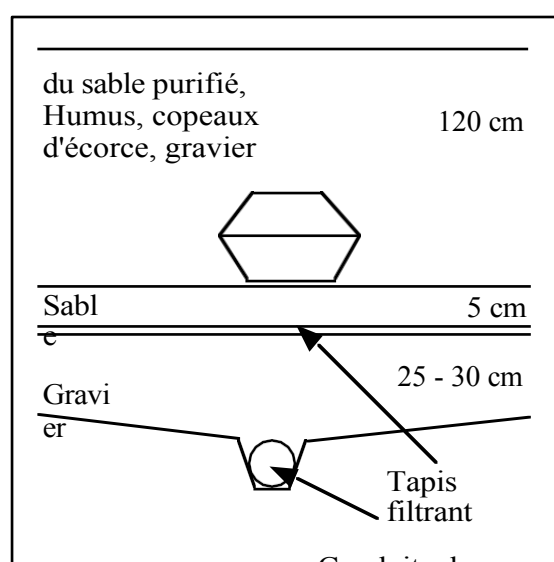


Fig. 5.1 : Structure d'une tombe assainie selon l'entreprise Tony Linder + Partner AG, Altdorf.

Lorsque les conditions du sol sont défavorables (par ex. sol riche en argile) et qu'il n'existe pas d'alternative de terrain, le drainage d'un cimetière peut être envisagé comme mesure technique. Cela a été fait à plusieurs endroits dans le cadre de l'assainissement d'un cimetière, après que des troubles de la décomposition soient apparus dans le cimetière. L'"ancienne" terre du cimetière est alors excavée et évacuée. On y met de la nouvelle terre, composée d'humus et de sable ou de gravier (cf. fig. 5.1).

### 5.7.1. Vers Conduite de drainage

Aujourd'hui, les cimetières sont souvent équipés de conduites de drainage. Un drainage artificiel

L'arrosage peut être judicieux s'il est effectué en tant que mesure de protection contre la décomposition du corps. Il ne devrait toutefois être envisagé qu'en dernier recours, lorsque la réduction de la profondeur de la tombe, une plantation adéquate du terrain, des cercueils et des vêtements mortuaires facilement dégradables ainsi que, le cas échéant, du matériel de remplissage végétal dans le cercueil n'ont pas donné les résultats escomptés. Pour des raisons d'hygiène, une conduite de drainage n'est en revanche pas nécessaire - voire même contre-productive.

Une fonction importante du sol est son effet de filtre, qui augmente avec l'épaisseur de la couche de sol. En revanche, ce processus de nettoyage n'a pas lieu dans une conduite de drainage. Au lieu de cela, l'eau est évacuée à une vitesse d'écoulement relativement élevée. L'épuration de l'eau d'infiltration se limite donc à la couche de sol allant du fond de la fouille à la conduite de drainage. La question de la pureté de cette eau se pose maintenant.

l'eau et après son élimination ultérieure. Selon les études menées en 1976/77 sur l'eau de drainage dans les cimetières zurichois (cf. chap. 4.2.3. Transport d'agents pathogènes vers la nappe phréatique), il n'y a guère lieu de s'inquiéter de la pureté de cette eau. Il est toutefois souhaitable de procéder à des investigations supplémentaires, en particulier après de fortes précipitations.

L'élimination des eaux de drainage peut se faire de différentes manières : On peut imaginer un déversement direct dans une eau de surface ou une injection dans les égouts suivie d'une épuration dans une station d'épuration des eaux usées. Au cimetière de Witikon à Zurich, une troisième voie d'élimination a été choisie en automne 1996 avec un étang d'épuration biologique sur le site du cimetière.

Du point de vue de l'hygiène, le déversement des eaux de drainage dans les eaux de surface est considéré comme la moins bonne solution par rapport à l'infiltration profonde dans les eaux souterraines. Par rapport au drainage, l'eau qui s'infiltré dispose d'une plus grande couche de sol épuratrice. Un cimetière peut être considéré comme une exception, car il est situé sur un sol bien perméable avec un niveau élevé de la nappe phréatique et un captage d'eau proche. Dans cette configuration la plus défavorable, le drainage artificiel peut prévenir une éventuelle atteinte à la nappe phréatique.

Lors du déversement d'eau de drainage dans une eau de surface, il faut penser à un "scénario catastrophe", dans lequel de fortes précipitations succèdent à une période de sécheresse prolongée. Dans ce cas, les microbes retenus par adsorption sont libérés de manière non échelonnée dans l'eau d'infiltration et finalement dans la conduite de drainage. Il serait souhaitable d'approfondir les recherches sur la concentration de bactéries pouvant être libérées dans ce scénario. Mais même dans ce cas, il ne faut probablement pas s'attendre à des désagréments hygiéniques. Les quantités de matière organique introduites dans le cimetière, et donc la base nutritive pour la croissance des bactéries, devraient être trop faibles pour cela.

Mais on ne peut pas non plus approuver sans réserve l'élimination des eaux de drainage par des stations d'épuration des eaux usées (STEP). Pour comprendre cela, une brève introduction aux stations d'épuration est toutefois nécessaire. Outre les eaux usées domestiques et industrielles, les STEP reçoivent également des eaux étrangères, c'est-à-dire des eaux souterraines et de surface non polluées qui pénètrent dans les canalisations ainsi que des eaux de ruissellement.<sup>27</sup> En cas de fortes précipitations, l'afflux d'eaux étrangères peut prendre une ampleur qui entraînerait le débordement des bassins d'épuration en fonctionnement normal. Pour éviter cela, les eaux usées sont dirigées vers un bassin d'orage. Dès que la capacité de ce dernier est également épuisée, les eaux usées doivent être déversées dans le milieu récepteur (cours d'eau ou lac) sans être traitées. Pour décharger les stations d'épuration, il a donc été question, il y a quelques années, de ne plus déverser l'eau de pluie des rues dans les égouts, mais de la laisser s'infiltrer dans un lit de gravier sur le côté de la route.

L'évacuation des eaux de drainage des cimetières vers une station d'épuration des eaux usées (STEP) entraîne une pollution supplémentaire de celle-ci par des eaux à peine contaminées (cf. chapitre 4.2.3. Transport d'agents pathogènes vers les eaux souterraines). En cas de fortes précipitations, lorsque la probabilité de transfert de bactéries depuis les cimetières est encore la plus élevée, il est possible que les eaux de drainage soient acheminées vers des eaux de surface sans être traitées, en raison d'une surcharge de la STEP.

Pour les raisons susmentionnées, les conduites de drainage ne devraient être utilisées dans les cimetières que si le processus de décomposition des corps risque d'être entravé par l'accumulation d'eau. Pour l'évacuation de l'eau, on peut aussi envisager une infiltration contrôlée à l'intérieur ou à l'extérieur du cimetière.

<sup>1</sup>Rubner (1912) : p. 198

<sup>2</sup>d'après une communication orale de Fr. Jucker, doctorante à l'EAWAG Dübendorf

<sup>3</sup>selon une communication orale de M. le professeur Schlüchter

<sup>4</sup>communication orale du professeur Schlüchter

<sup>5</sup>Rubner (1912) : p. 191

<sup>6</sup>Rodriguez (1985) : p. 848/850

<sup>7</sup>cf. Mant (1987) : p. 69

<sup>8</sup>loc. cit.

<sup>9</sup>Schneider (1982) : p. 158 et suivantes.

<sup>10</sup>Bill/Etter : p. 28

<sup>11</sup>Illi (1992) : p. 74

<sup>12</sup>Illi (1992) : p. 75

<sup>13</sup>Illi (1992) : p. 137

<sup>14</sup>Rubner (1912) : p. 199

<sup>15</sup>loc. cit.

<sup>16</sup>loc. cit.

<sup>17</sup>voir Rubner (1912) : p. 199

<sup>18</sup>"Recommandations de la direction de la santé d'Uri concernant les prescriptions pour l'inhumation", signées par le conseiller d'État Franz Achermann le 30 juin 1980.

<sup>19</sup>Mant (1987) : p. 68

<sup>20</sup>tiré de Materialkunde für Schreiner (p. 51). Cité par Gerber : p. 17

<sup>21</sup>cf. par exemple le règlement sur les obsèques et le cimetière de la commune de Wollerau (approuvé par le Conseil d'État le 19 janvier 1993) : Article 14

<sup>22</sup>Hauser (1994) : p. 25

<sup>23</sup>voir Healing (1995) : R 61

<sup>24</sup>cf. "Recommandations de la direction de la santé d'Uri concernant les prescriptions pour l'inhumation", signées par le conseiller d'Etat Franz Achermann le 30 juin 1980.

<sup>25</sup> loc. cit.

<sup>26</sup>cf. par exemple le règlement sur les obsèques et le cimetière de la commune de Wollerau (approuvé par le Conseil d'Etat le 19 janvier 1993) : Article 13

<sup>27</sup>Heintz/Reinhardt (1991) : p. 256 s.



# MERCI

De nombreuses personnes m'ont apporté leur soutien en me fournissant des informations, des conseils et des actions pendant la rédaction du mémoire de fin d'études "Leichenzersetzung im Erdgrab" (décomposition des corps dans les tombes en terre), qui est à la base de ce rapport. Que toutes ces personnes soient chaleureusement remerciées. Hansjürg Büchi mérite une mention particulière. Il m'a encadré de manière louable pendant les quatre mois du semestre de diplôme. Il m'a fait part de ses suggestions lors de nombreuses discussions, a coordonné les recherches sur le terrain au cimetière de Zurich-Affoltern et a relu en permanence les chapitres terminés en y apportant des remarques critiques. Outre Hansjürg Büchi, le Dr Peter Weidler et le professeur H. Sticher ont également relu certains chapitres et apporté des améliorations. En tant que professeur diplômé et personne de contact pour toutes les questions relatives au sol, M. Sticher a également été impliqué dans le travail de diplôme. Nous le remercions chaleureusement pour tous ses services et renseignements. Le professeur Ch. Schlüchter (Université de Berne) a également été impliqué dans ce travail de diplôme. Son charme bernois a contribué à créer une atmosphère positive lors des deux entretiens de la première phase du travail de diplôme. Monsieur Schlüchter était responsable des questions relatives à la géologie. Le traitement géologique est toutefois un peu trop court dans ce rapport, mais il sera traité en détail dans le travail de diplôme de Gisela Eichenberger (date de remise prévue : printemps 1998).

Lors des recherches sur le terrain dans le cimetière de Zurich-Affoltern, Hansjürg Büchi a mobilisé toute une équipe de chercheurs. Nous remercions également toutes les personnes qui y ont participé pour leur engagement. Il s'agit notamment de Susanne Schott, Gisela Eichenberger, Pirmin Mader, Holger Hoffmann-Riem et Peter Weidler. C'est à Gisela Eichenberger que je dois les représentations des profils de sol de l'annexe D.

Je remercie également l'entreprise Tony Linder + Partner AG à Altdorf. Je remercie tout particulièrement Monsieur Linder qui m'a permis d'assister à la rénovation d'un cimetière. En outre, Monsieur Linder a pris le temps de me faire part de sa riche expérience en matière d'assainissement de cimetières. Cela m'a permis de bien débiter mon travail de diplôme.

Last but not least, il convient d'adresser des remerciements particuliers au service des pompes funèbres de la ville de Zurich et à ses employés. C'est à leur initiative que ce travail de diplôme a été mis au concours au département des sciences de l'environnement de l'EPF de Zurich. Outre le fait qu'ils m'ont permis de traiter ce sujet intéressant, ils ont toujours été prêts à m'aider, ont offert leur aide pour les enquêtes de terrain au cimetière de Zurich-Affoltern et ont soutenu la rédaction finale de ce rapport par une contribution financière.

Adresse de l'auteur : Ivo Willimann  
9, rue Joder  
CH-6221 Rickenbach LU

## GLOS SAR

<b>aérobic</b>	Nécessitant de l'oxygène pour vivre (chez les organismes).
<b>Alcalinité</b>	Teneur d'une solution en substances basiques.
<b>anaérobic</b>	Vivant en l'absence d'oxygène (pour les organismes).
<b>Détritivores</b>	Consommateurs animaux de matières mortes.
<b>Dissociation</b>	Désintégration de molécules en ions ou en atomes. Dans ce rapport, il faut toujours entendre par là la séparation d'un proton "acide".
<b>Enzymes</b>	Composés protéiques spéciaux capables de catalyser certaines transformations chimiques.
<b>Hydrolyse</b>	Division de composés chimiques par l'eau.
<b>Inhibition</b>	Inhibition d'un processus biochimique.
<b>Capacité d'échange cationique (CEC)</b>	La quantité maximale d'ions à charge positive (cations) pouvant être sorbée ou échangée. Etant donné que la majeure partie de la surface du sol porte une charge négative et que certains cations comptent parmi les éléments nutritifs essentiels des plantes, l'importance du CEC est bien plus grande que celle de la capacité d'échange d'anions.
<b>Lipases</b>	Enzymes qui décomposent les graisses.
<b>Lipide</b>	Terme générique désignant toutes les graisses et tous les lipides.
<b>Lipides</b>	Terme générique désignant le groupe hétérogène des substances analogues aux graisses.
<b>Pores primaires</b>	Les cavités du sol qui résultent de la forme et de l'empilement des grains individuels.
<b>Protéases</b>	Enzymes qui décomposent les protéines.
<b>Pyrite</b>	Un sulfure de fer ( $FeS_2$ ).
<b>Potentiel d'oxydoréduction</b>	Une mesure de la tendance des composés ou des éléments à céder des électrons.
<b>surface spécifique</b>	Rapport entre la somme de toutes les interfaces solide-liquide et solide-gaz et le volume d'un échantillon de sol.

<b>sous-cutané</b>	Situé sous la peau. La peau "au sens large" se compose de trois couches : l'épiderme, le derme et l'hypoderme. L'épiderme et le derme sont réunis pour former la cuticule et sont considérés comme la peau "au sens strict". L'hypoderme se rattache à la cuticule sans délimitation nette. Il s'agit d'un tissu conjonctif lâche dans lequel se trouve une quantité plus ou moins importante de tissu adipeux.
<b>Synergisme</b>	L'interaction d'organismes, de substances ou de facteurs qui se favorisent mutuellement.
<b>Texture</b>	Décrit la composition d'un sol en fonction de la taille de ses grains minéraux individuels. Elle est également appelée répartition des grains.
<b>"sol fatigué par la décomposition"</b>	Un sol de cimetière qui, après plusieurs inhumations, montre une tendance accrue aux troubles de la décomposition. Il n'est toutefois pas établi si ce processus se produit réellement. (Cf. à ce sujet la discussion au chapitre 3.4. Effets de l'activité du cimetière sur le sol).

# BIBLIOGRAPHIE

- Baccini P. (1992) : Métabolisme de l'anthroposphère. Documents de cours, EPF Zurich.
- Bajpai R. K., Iannotti E. L. (1988) : Inhibition des produits. In : Erickson L. E., Fung, D. Y-C : Handbook on anaerobic fermentations. Marcel Dekker Inc.
- Begon M., Harper J. L., Townsend C. R. (1991) : Ecologie. Birkhäuser Verlag, Basel-Boston-Berlin.
- Montagne, S. (1975) : Décomposition et destruction de cadavres. In : Mueller B. : Médecine légale. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Bill J., Etter H. : Le site funéraire du haut Moyen Age du "Runden Büchel" à Balzers. Tiré à part du volume 81 de l'annuaire de l'association historique de la principauté du Liechtenstein.
- Borneff J., Borneff M. (1991) : Hygiène. Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Brock T. D., Madigan M. T.(1991) : Biology of Microorganisms (Biologie des micro-organismes). Sixième édition, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Brock T. D. et al. (1994) : Biology of Microorganisms (Biologie des micro-organismes). Septième édition, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Coe J. I. (1974) : Chimie post-mortem : Considérations pratiques et revue de la littérature. Journal of Forensic Sciences, 19 : 13-32.
- Cotton G. E., et al. (1987) : Preservation of Human Tissue Immersed for Five Years in Fresh Water of Known Temperature. Journal of Forensic Sciences, Vol 32, No. 4 : 1125-1130.
- Cunningham A. B., et al. (1991) : Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydro-dynamics. Environ. Sci. Technol, 25 (7), 1305-1311.
- Daldrup T. (1978) : Postmortaler Eiweisszerfall in menschlichen Organen. Triltsch Verlag, Düsseldorf.
- Danielopol D. L. (1983) : Écologie aquatique : l'influence de la pollution organique sur l'écosystème des eaux souterraines du Danube dans la région de Vienne et de Basse-Autriche. Ministère fédéral autrichien de la santé et de la protection de l'environnement.
- Dorn J. M., Hopkins B. M. (1985) : Thanatochemistry (Chimie de la thanatose). Reston Publishing Company, Reston.
- Evans, W. E. (1963) : Adipocere formation in a relatively dry environment. Medicine, Science and the Law, 3, 145-153.
- Fellenberg G. (1994) : Le sol en détresse. Trias, Stuttgart.

- Flühler H. (1991) : Physique du sol. Manuscrit du cours du même nom, EPF Zurich.
- Flühler H. (1995a) : Bases de la physique du sol. Mise à jour des chapitres 2, 3, 6 et annexe, EPF Zurich.
- Flühler H.(1995b) : Régime hydrique des sols. Documents pour l'Ecole doctorale DBG à La Vancelle (projet).
- Gerba C. P., Bitton G. (1984) : Microbial Pollutants : Their Survival and Transport Pattern to Groundwater. In : Bitton, Gerba : Groundwater - Pollution - Microbiology. John Wiley & Sons.
- Gerber H. (probablement 1976) : Exigences techniques et légales pour un cercueil suisse. Auto-édition Sargfabrik Gerber, Lindau.
- Gerlach, U., et al. (1989) : Innere Medizin für Krankenpflegeberufe (Médecine interne pour les professions infirmières). Thieme Verlag, Stuttgart- New York.
- Gisi U., et al. (1990) : Écologie du sol. Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Hall D. G. M., et al. (1977) : Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. Soil Survey Technical Monograph No. 9, Harpenden.
- Hauser A. (1994) : Des dernières choses. Editions Neue Zürcher Zeitung, Zurich.
- Healing T. D., Hoffman P. N., Young S. E. (1995) : The infection hazards of human cadavers. Communicable Disease Report, Vol. 5, Review Number 5, Londres.
- Heintz A., Reinhardt G. (1991) : Chimie et environnement. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Henderson J. D. (1987) : Factors determining the state of preservation of human remains. In : Boddington A., et al. : Death, decay and reconstruction. Manchester University Press.
- Hugger P. (fév. 1984) : Les cimetières urbains de Zurich. Copies de documents relatifs à un séminaire d'ethnologie à l'Université de Zurich.
- Illi M. (1992) : Où sont allés les morts. Chronos Verlag, Zurich.
- Janaway R. C. (1987) : The preservation of organic materials in association with metal artefacts deposited in inhumation graves. In : Boddington A., et al. : Death, decay and reconstruction. Manchester University Press, Manchester.
- Killam E. W. (1990) : The Detection of Human Remains (La détection des restes humains). Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois.
- Kuttler W. (1995) : Manuel d'écologie. Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Mann R. W., et al. (1990) : Time since death and decomposition of the human body : Variables and observations in case and experimental field studies. Journal of Forensic Sciences, 35(1), 103-111.
- Mant, A. K. (1987) : Knowledge from post-war exhumations. In : Boddington A., et al. : Death, decay and reconstruction. Manchester University Press.
- McCarty P. L., et al. (1984) : Microbiological Processes Affecting Chemical Transformations in Groundwater. Dans : Bitton, Gerba : Groundwater - Pollution - Microbiology. John Wiley &

Sons.

## BIBLIOGRAPHIE

- Mellen P. F. M., et al. (1993) : Observations expérimentales sur la formation des adipocères. *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 38, No. 1 : 91-93.
- Ottmann F. (1987) : Créer ou aménager un cimetière : géologie, techniques, hygiène. Editions du Moniteur, Paris.
- Reh, H. (1960) : Diskussionsbemerkung zum Vortrag H. J. Wagner. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 49, 720-722.
- Robert M., Berthelin J. (1986) : Rôle des facteurs biologiques et biochimiques dans la météorologie des minéraux du sol. In : Huang P. M., Schnitzer M. (Eds.) : *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. Soil Science Society of America, Madison.
- Rodriguez W. C., Bass W. M. (1985) : Décomposition des corps enterrés et méthodes pouvant aider à leur localisation. *Journal of Forensic Sciences*, 30(3), 836-852.
- Rubner M., et al. (1912) : *Handbuch der Hygiene*. Volume 4, div. 1, Verlag von S. Hirzel, Leipzig.
- Scheffer F., Schachtschabel P. (1992) : *Lehrbuch der Bodenkunde (Manuel de pédologie)*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schertenleib H. (1996) : *La chambre de la Signora*. Kiepenheuer & Witsch.
- Schlegel H. G. (1992) : *Microbiologie générale*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York.
- Schmidt, G. (1969) : Modifications post-mortem de substances médicamenteuses et de poisons dans les organes et les liquides corporels, y compris la formation de nouvelles substances perturbatrices. In : *Gadamers Lehrbuch der chemischen Toxikologie*, Bd. 1, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- Schmidt R. F. (1983) : *Biologie médicale de l'homme*. Editions Piper & Co, Munich. Schneider J. et al. (1982) : *Le Münsterhof à Zurich*. Walter-Verlag, Olten.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (1993) : *Environmental Organic Chemistry (Chimie organique environnementale)*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Sigg L., Stumm W. (1994) : *Chimie aquatique*. Verlag der Fachvereine Zürich, Teubner Verlag Stuttgart.
- Takatori T., et al. (1986) : Microbial Production of Hydroxy and Oxo Fatty Acids by several microorganisms as a Model of Adipocere Formation. In *Forensic Science International*, 32 : 5-11.
- Takatori T., et al. (1987) : The Mechanism of Experimental Adipocere Formation : Substrate Specificity on Microbial Production of Hydroxy and Oxo Fatty Acids. Dans *Forensic Science International*, 35 : 277-281.
- Thalman R. (1978) : *Urne ou cercueil ?*. Publications universitaires européennes, série 9, XV, div. A, tome 14, Editions Peter Lang, Berne-Francfort-sur-le-Main-Las Vegas.
- van Wyk C. W., Theunissen F., Phillips V. M. (1990, décembre) : A Grave Matter - Dental Findings of People Buried in the 19th and 20th Centuries. *The Journal of Forensic Odontostomatology*, Vol. 8, No. 2.





Vass A. A., et al. (1992) : Time Since Death Determinations of Human Cadavers Using Soil Solution. *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 37 (5), 1236-1253.

Wagner, H. (1961) : L'influence des processus physico-chimiques post-mortem par les antibiotiques et les sulfonamides. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 51, 572-581.

Wagner, H. (1960) : Influence des antibiotiques et des sulfonamides sur la putréfaction cadavérique. *Deutsche Zeitschrift für die gesamte gerichtliche Medizin*, 49, 714-720.

Wallhäusser K. H. (1978) : Stérilisation - Désinfection - Conservation. Thieme Verlag, Stuttgart.

Weinberg E. D. (1987) : The influence of soil on infectious disease. In : *Experientia* 43, Birkhäuser Verlag, Bâle.

Zeyer J. (1994) : Biologie du sol. Manuscrit du cours du même nom, EPF Zurich.

## **Table des matières**

### **Annexe A**

Données et observations sur l'expérience de RODRIGUEZ/BASS

### **Annexe B**

Effet acide des acides gras à longue chaîne

### **Annexe C**

Compilation des catabolites de cadavres

### **Annexe D**

Données relatives aux sondages pédologiques et géologiques dans le cimetière de Zurich-Affoltern

## Annexe A : Données et observations relatives à l'expérience de Rodriguez/Bass

Les aspects de cette expérience ont été abordés dans les chapitres 1.4.2 Température et 2.4.1. Inhibition du processus de putréfaction.

Corps	1	2	3
<b>Profondeur de commande</b>	1.2 m	0.6 m	0.3 m
<b>Date de commande</b>	18. 5. 82	4. 6. 83 (?)	24. 8. 83
<b>Exhumation</b>	18. 5. 83	7. 12. 83	7. 11. 83
<b>Robes</b>	pantalons synthétiques	Pantalons en coton, bottes en cuir	pantalons synthétiques
<b>Température du corps au moment de l'inhumation (≈ température du sol)</b>	≈20°C	≈27°C	≈38°C
<b>augmentation moyenne de la température</b>	≈ 3.4°C	≈ 5°C	≈ 10°C
<b>État</b>	conservation remarquable	peu de décomposition	forte décomposition. Les organes internes sont dégradés.
<b>Degré de squelettisation</b>	minimale, limitée à la tête, aux mains et aux pieds	mains et pieds en permanence, tibia faible libération	très avancé, pieds momifiés
<b>Adipocire</b>	la plus grande partie le corps est fortement recouvert	apparition modérée sur la poitrine et les jambes	petites quantités le long des parois restantes de la cavité thoracique supérieure
<b>Boîte thoracique, abdomen</b>	légèrement enfoncé	Caisse thoracique : intacte Abdomen : fortement comprimé	sternum partiellement enfoncé
<b>Crâne</b>	de grandes quantités de tissus sont encore présentes, l'orbite et la région nasale sont libres	entièrement recouvert de tissu, à l'exception de la mâchoire supérieure et inférieure, de l'orbite et de la région nasale qui sont libres	squeletté
<b>Activité des insectes aasins</b>	pas de	pas de	Diptères à différents stades
<b>Démontage des vêtements</b>	aucun signe	certains signes	signes mineurs
<b>pH avant</b>	5.3	4.6	4.8
<b>pH après</b>	5.8	5.7	6.9
<b>Différence de pH</b>	+ 0.5	+ 1.1	+ 2.1
<b>Remarques</b>			

Corps	4	5	6
<b>Profondeur de commande</b>	0.3 m	0.3 m	0.3 m
<b>Date de commande</b>	14. 10. 83	23. 1. 84	23. 1. 84
<b>Exhumation</b>	20. 11. 83	11. 4. 84	11. 4. 84
<b>Robes</b>	Pantalons en coton	pas de	pas de
<b>Température du corps au moment de l'inhumation (≈ température du sol)</b>	≈ 18°C		
<b>augmentation moyenne de la température</b>	≈ 7°C		
<b>État</b>	pas de signes marquants de décomposition	décomposition moyenne	décomposition moyenne
<b>Degré de squelettisation</b>		faible ; pied droit dû à un rongeur, lésion partiellement libre	
<b>Adipocire</b>		peu de traces sur toute la longueur des jambes	
<b>Boîte thoracique, abdomen</b>	boîte thoracique : intacte ; abdomen : très sanguinolent		
<b>Crâne</b>	Visage : légèrement ensanglanté et certaines déformations		
<b>Activité des insectes aasin</b>	peu de larves de diptères	peu de larves de diptères	peu de larves de diptères
<b>Démontage des vêtements</b>	fortement infecté par des champignons		
<b>pH avant</b>	5.7	5.8	5.8
<b>pH après</b>	5.9	5.9	5.8
<b>Différence de pH</b>	+ 0.2	+ 0.1	= 0
<b>Remarques</b>	des quantités moyennes de liquide corporel s'écoulaient du nez, de la bouche et du rectum	autopsié	autopsié

#### Littérature :

Rodriguez W. C., Bass W. M. (1985) : Décomposition des corps enterrés et méthodes qui peuvent aider à leur localisation. *Journal of Forensic Sciences*, 30(3), 836-852.

## Annexe B : Effet acide des acides gras à longue chaîne

Les acides gras à longue chaîne devraient avoir une constante d'acidité théorique estimée à environ cinq. Cette valeur, qui indique la force de l'acide par rapport à l'eau, résulte de la détermination de la constante correspondante pour les acides gras à chaîne courte et de la considération qu'un allongement de la chaîne hydrocarbonée n'exerce pas d'influence importante en raison de la grande distance par rapport au groupe acide.<sup>i</sup> Les valeurs pK de l'acide butyrique, de l'acide caproïque et de l'acide heptanoïque sont respectivement de 4,81, 4,89 et 4,88.<sup>ii</sup> En raison de la solubilité extrêmement faible des acides gras à chaîne longue dans l'eau, il ne peut toutefois s'agir que d'une valeur théorique. L'acide oléique est considéré comme pratiquement insoluble dans l'eau, l'acide palmitique est décrit comme totalement insoluble.<sup>iii</sup> (Selon SCHWARZENBACH, tous les composés organiques sont toutefois solubles dans une certaine mesure dans l'eau. La question est seulement de savoir si la méthode analytique est adaptée à leur détermination.<sup>iv</sup>) Leur potentiel de libération de protons n'est donc envisageable que dans une mesure limitée.

La libération de protons d'acides gras dans l'eau s'accompagne d'un transfert de charges qui doit être compensé. Avec des particules de sol, un tel processus se ferait par échange de cations. On peut imaginer que ce processus se déroulera de manière similaire avec les acides gras en contact avec l'eau. Si les acides gras sont amorphes, ils orienteront - comme les autres tensioactifs - l'extrémité polaire de la molécule vers la phase aqueuse et l'extrémité apolaire vers la phase des acides gras. De cette manière, les groupes acides des acides gras sont en contact avec l'eau à l'interface. Par analogie avec le sol, la charge opposée aux protons libérés peut être envisagée comme une double couche électrique.

(Ces explications reposent sur des réflexions théoriques et ne sont pas fondées sur des expériences).

### Littérature :

Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (1993) : Environmental Organic Chemistry (Chimie organique environnementale). John Wiley & Sons, Inc, New York.

Handbook of Chemistry and Physics

(Manuel de chimie et de physique). The

Merck Index, 11e éd., 1989.

---

i)cf. Schwarzenbach (1993) : p. 167

ii)Handbook of Chemistry and Physics

iii)The Merck Index, 11e éd., 1989

iv)Schwarzenbach (1993) : p. 107

## Annexe C : Compilation de Catabolites cadavériques

Cette liste n'a pas la prétention d'être exhaustive. Elle a uniquement pour but de donner un aperçu des classes de substances auxquelles il faut s'attendre dans le cadre de la décomposition des cadavres.

### Amine

- Ptomaine (Schmidt, 193)
- le plus souvent des amines aromatiques (Schmidt, 228)
- les bases d'ammonium quaternaire (Schmidt, 193)
- Mono- et diamines (Schmidt, 226)

### Acides organiques

- Acide succinique : trouvé relativement fréquemment dans les organes putréfiés (Schmidt, 227)
- Acide benzoïque (Schmidt, 226)
- Acide oxalique (Schmidt, 227)
- Acide salicylique (Schmidt, 227)
- Acides aminés (Schmidt, 193)
- Acide palmitique (Berg, 71)
- Acide oléique (Berg, 71)
- Acide formique (Vass)
- Acide acétique (Vass)
- Acides caproïque et heptanoïque : trouvés pendant les mois froids (< 10°C) (Vass)
- Acides propioniques, butyriques et valériques : libérés dans certaines proportions (Vass)
- acides aromatiques (Schmidt, 193)

### Sulfures

- Sulfure d'hydrogène (Schmidt, 226)
- Alkylsulfures (Schmidt, 193)
- Acides alkylsulfuriques (Schmidt, 193)
- Mercaptans (Schmidt, 193)
- Sulfoxydes (Schmidt, 226)
- Composés de thiosulfate, de thiourée et d'acide thiophosphorique (Schmidt, 226)

### Composés phosphorés (Schmidt, 226)

### Alcools

- 95 % d'éthanol (Schmidt, 218)
- 1,5 % de méthanol, jusqu'à 15 % en cas de forte pourriture (Schmidt, 218)
- 3 à 4 % d'alcools supérieurs, selon la colonisation des germes, n-propanol, iso-propanol, n-butanol, sec-butanol et autres (Schmidt, 218)
- Glycérine (Berg, 71)

### Cétones

- Acétone (Schmidt, 226)

### **Aldéhydes**

- Formaldéhyde (Schmidt, 217)
- Acétaldéhyde (Schmidt, 217)

### **Électrolytes**

Cf. article de Vass (chronologie de la dissémination)

- Sodium : diminution immédiate mais d'ampleur variable p.m. (Coe, 18)
- Chlorure : Diminution dans le plasma par transfert intracellulaire. Teneur moyenne : 80-90 mEq/l après 24 h p.m. (Coe, 18)
- Potassium : augmentation marquée (jusqu'à 18 mEq/l) dans la première heure p.m. (libération rapide des cellules), puis augmentation plus faible ( ?) (Coe, 18)
- Calcium : reste constant au début de la phase post-mortem (Coe, 19)
- Phosphore : augmentation de la teneur en phosphore inorganique à la 1ère h p.m. Après 18 h p.m. : 20 mEq/l. Le phosphore organique montre également une augmentation de concentration (Coe, 19)
- Magnésium : légère augmentation seulement. Dès le début de l'hémolyse : augmentation rapide de la concentration (Coe, 19).

### **Plus de produits**

- Ammoniac (Schmidt, 193)  
forte augmentation après les 8 premières h p.m. (Coe, 16)
- Dioxyde de carbone (Schmidt, 193)
- Monoxyde de carbone (Schmidt, 226)
- Méthane (Rubner, 181)
- Hydrogène (mont. 69)
- scatol, indol, etc. (Rubner, 181)
- Soufre ammonium (Rubner, 181)
- Acide cyanhydrique (Schmidt, 218)
- Nitrite et nitrate (Schmidt, 227)

### **Littérature :**

Montagne, S. (1975) : Dégradation et destruction de cadavres. In : Mueller B. : Gerichtliche Medizin, p. 62-106. Springer, Berlin-Heidelberg-New York.

Coe J. I. (1974) : Chimie post-mortem : Considérations pratiques et revue de la littérature. J. For. Sci, 19 : 13-32.

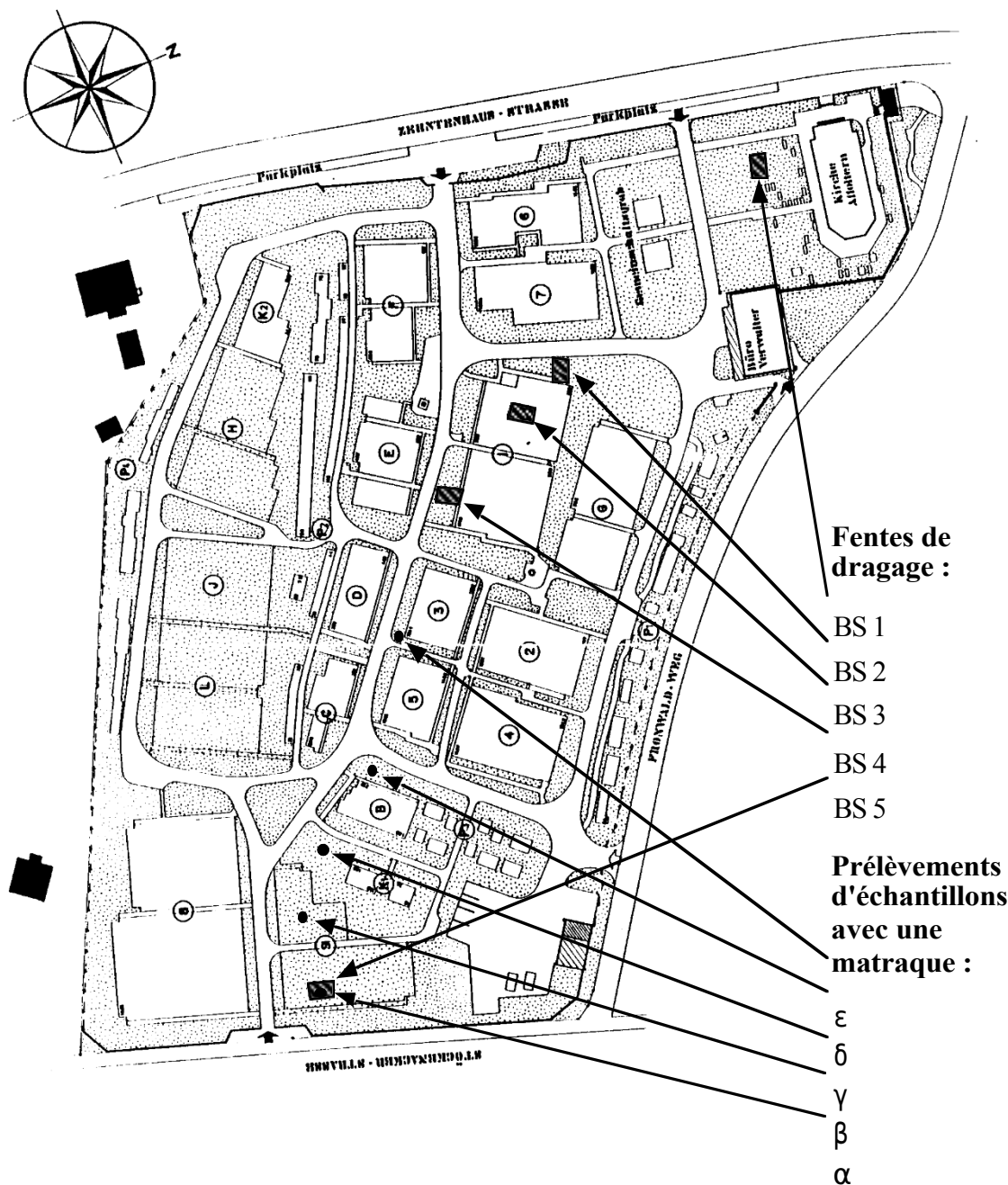
Rubner M., et al. (1912) : Handbuch der Hygiene. Volume 4, div. 1, Verlag von S. Hirzel, Leipzig.

Schmidt, G. (1969) : Modifications post-mortem de substances médicamenteuses et de poisons dans les organes et les liquides corporels, y compris la formation de nouvelles substances perturbatrices. In : Gadamer Lehr- buch der chemischen Toxikologie, Bd. 1, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Vass A. A., et al. (1992) : Time Since Death Determinations of Human Cadavers Using Soil Solution. Extrait de : Journal of Forensic Sciences, Vol. 37 (5), 1236-1253.

# Annexe D : Données sur les sondages pédologiques et géologiques au cimetière de Zurich-Affoltern

Plan de situation du cimetière de Zurich-Affoltern





## **Géologie du cimetière de Zurich-Affoltern**

(communication écrite de Hansjürg Büchi)

Le cimetière de Zurich-Affoltern se trouve au bord d'une terrasse qui est fermée à l'est par une arête de terrain d'environ 5 mètres de haut vers le niveau le plus bas de la vallée. L'arête du terrain a été marquée par la construction de la route, mais sa formation est d'origine naturelle. Le sous-sol du cimetière est hétérogène, la partie centrale est dominée par des graviers sableux (modérément à bien arrondis), qui sont remplacés vers le bord du terrain par des roches meubles siliceuses avec peu de gravier et une part d'argile élevée. Vers le sud-ouest, le sous-sol de la terrasse de terrain devient de plus en plus argileux, la partie grossière disparaît en grande partie. Les sols argileux sont toutefois bien drainés, de sorte que l'on peut supposer que le corps de gravier s'enfonce sous le matériau de support argileux et fait office de drainage.

Le cimetière se trouve dans une région marquée par le retrait des glaciers à la fin de la dernière période glaciaire, dans la vallée entre les moraines terminales du stade de Schlieren (près de Watt) et du stade de Zurich (près de Dübendorf). HANTKE (1967) a cartographié le site de Friedhof comme une moraine de fond. Au vu des roches meubles rencontrées, cette classification doit cependant être considérée comme erronée. Sur l'ensemble du terrain, on ne trouve pas de roches meubles mal triées à matrice de silice, ni de pierres anguleuses et de blocs grossiers. Il s'agirait plutôt d'un remblai de ruisseau à l'avant de la glace qui se retire (peut-être aussi le résultat d'un écoulement de bord de glace à travers le ravin du Holderbach en descendant du Höggerberg). Des roches à grain fin se sont alors déposées à gauche et à droite du panache alluvial surélevé. La formation du bord du terrain à l'ouest du cimetière n'est pas claire. Il est possible qu'il s'agisse du produit de la fonte d'une masse de glace morte, au bord de laquelle les sédiments siliceux auraient été déposés à l'origine. La surface plus ou moins horizontale à l'origine se serait affaissée au cours du processus de fonte suivant et aurait ainsi conduit à la formation du bord. Les marécages qui ferment le niveau inférieur de la vallée à l'ouest (Katzensee et surfaces marécageuses) montrent qu'une telle interprétation n'est pas absurde. Il est probable que le terrain actuel du cimetière ait été fermé à l'est par une eau dormante (peut-être une mare de bord de glace ou un trou de glace morte) dans laquelle des matériaux argileux se sont déposés après le tarissement progressif de l'apport de gravier.

### **Littérature :**

Hantke, R. et al. (1967) : Carte géologique du canton de Zurich et des régions voisines. Vjschr. Natf. Ges. 112/2. Zurich.

Jäckli, Heinrich (1989) : Géologie de Zurich. De la formation du paysage à l'intervention de l'homme. Orell Füssli, Zurich.

## **Compléments sur la présence de calcaire dans le sol du cimetière de Zurich- Affoltern**

Dans le cimetière de Zurich-Affoltern, on constate des irrégularités dans la présence de calcaire, qui sont à mettre en relation avec le sous-sol hétérogène décrit ci-dessus. Jusqu'à la fente d'excavation (BS) 4, on constate une nette décalcification du sol à partir du sud-est. A l'endroit  $\gamma$  (cf. plan de situation du cimetière), le sol se révèle encore calcaire en dessous des 10-15 premiers cm (horizon Ah). En revanche, à l'endroit  $\delta$ , la présence de calcaire se limite à quelques pierres dans les 80 cm supérieurs. La terre fine, en revanche, est exempte de calcaire. A l'endroit  $\epsilon$ , on ne trouve plus de calcaire dans l'ensemble de l'échantillon de sol (jusqu'à 0,9 m de profondeur). Les limites calcaires ne peuvent donc pas être déterminées à  $\delta$  et  $\epsilon$  en raison de la trop faible profondeur d'analyse. A cet égard, les fentes de la drague ont donné de meilleurs rendements d'information. A l'endroit du BS 4, la limite calcaire se situe à 1,6 m de profondeur de sol. Dans le BS 2, la limite du calcaire n'est plus qu'à 0,74 m de profondeur. Sur le côté nord-ouest du BS 4, la tendance à la décalcification croissante ne s'est donc plus confirmée.

(Les BS 3 et BS 1 situés dans des champs de fouilles ne sont pas significatifs en ce qui concerne la détermination des limites calcaires en raison de la stratification perturbée. A l'exception de l'humus de remblai (BS 4), ces deux profils de sol se révèlent calcaires dans tous les horizons de sol).