

LES DEFAUTS MOISIS TERREUX DES VINS : LA GEOSMINE IDENTIFIEE COMME PRINCIPALE RESPONSABLE

Stéphane LA GUERCHE

Université Victor Segalen - Bordeaux II

Cet article a obtenu le Grand Prix 2005 de l'Académie AMORIM, 11 Villa Wagram Saint-Honoré, F-75008 PARIS www.academie-amorim.com

La récolte de vendanges botrytisées, marquées par des odeurs fongiques ou moisies n'est pas un phénomène récent (1;2). Cependant, au cours de ces dernières années, plusieurs défauts aromatiques à caractère fongique, moisi ou terreux associés au développement plus ou moins visible de pourritures sur les raisins ont été mis en évidence dans des vins de différentes régions viticoles (Bordelais, Beaujolais, Val de Loire, Bourgogne).

Les premiers travaux ont permis d'identifier dans les vins un composé présentant une forte odeur de terre humide, de betterave. Il s'agit de la (-)-géosmine, un composé bien connu comme polluant de l'eau (3). Ce composé est retrouvé dans des moûts avant fermentation et sa présence est toujours associée à des vendanges au moins partiellement touchées par la pourriture grise (4;5).

Toutefois, la géosmine n'est pas le seul composé responsable du caractère moisi terreux des vins. D'autres défauts terreux sont également apparus dans de grandes appellations du vignoble bourguignon.

L'importance des préjudices causés par ces problèmes sur la qualité des vins de nombreux cépages (Cabernet Sauvignon, Sémillon, Gamay, Chenin, Pinot noir) a donc motivé une étude approfondie visant, d'une part, à caractériser la nature des défauts associés à ces odeurs fongiques ou terreuses et, d'autre part, à préciser leur origine biologique et les conditions de leur expression au vignoble.

I. Caractérisation de défauts fongiques et/ou terreux sur les raisins, dans les moûts et dans les vins

Deux types de défauts fongiques et/ou terreux peuvent être à l'origine de déviations organoleptiques. Certains sont retrouvés au niveau des raisins et des moûts, mais ne sont pas perçus dans les vins. D'autres, en revanche, sont présents dans les raisins et les moûts et vont persister après fermentation et nuire à la qualité du vin. Une bonne connaissance de la nature chimique des composés responsables de tels défauts est donc essentielle à la compréhension de leur origine au vignoble.

1.1. Identification de défauts fongiques/terreux présents dans les raisins et les moûts

Des raisins, jus de raisins et vins issus de cépages Cabernet Sauvignon, Gamay, Pinot, Sémillon obtenus à partir de raisins touchés au moins partiellement par la pourriture grise et marqués par des caractères fongiques et terreux ont donc été analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à un mode de détection olfactométrique (CPG-O), qui a permis de mettre en évidence les zones odorantes les plus caractéristiques.

Une assez grande diversité de zones odorantes correspondant à des odeurs fongiques et terreuses peut être détectée (Tableau 1), selon la nature du cépage, le stade de développement et le type de pourriture des baies (6). Parmi les composés fréquemment identifiés, le 1-octen-3-ol, la 1-octen-3-one, le 2-octen-1-ol et le 2-heptanol sont systématiquement associés aux odeurs de champignon présentes dans les raisins touchés par la pourriture grise.

D'autres composés possédant des notes camphrées et terreuses ont aussi été identifiés soit dans des raisins blancs (Sémillon, Sauvignon), soit dans des raisins noirs (Cabernet Sauvignon, Pinot noir, Gamay) issus de vendanges récoltées après développement de pourriture grise due à *Botrytis cinerea*. Il s'agit du fenchol, de la fenchone, et du 2-methylisoborneol. Ce dernier paraît être, parmi les composés à odeur terreuse, le principal responsable du défaut moisi terreux des raisins noirs atteints par *B. cinerea*.

Odeur	Composés	Cépage ^b	Seuil olfactif (µg/l) ^c			Teneurs retrouvées dans des moûts (µg/l)	Contribution au caractère défectueux des vins
			eau	solution modèle	vin		
champignon	1-octen-3-one	CS - M - S	0.003	0.03	0.07	0 - 0,01	oui, parfois
	1-octen-3-ol	CS - M G - S	2	20	40	0 - 20	oui
	2-octen-1-ol	S	20	-	-	0 - 0,01	limitée
	2-heptanol	S	70	-	-	0 - 0,06	limitée
	non identifié	S	-	-	-	-	limitée
	non identifié	S	-	-	-	-	limitée
terreux ^a	2-methylisoborneol	CS - M - PN	0.012	0.04	0.055	0 - 0,07	oui, limitée dans le temps
	fenchol	S	50	-	-	0 - 0,01	oui, parfois
	fenchone	S	500	-	-	0 - 0,025	limitée
	géosmine	CS - M - G	0.01	0.04	0.05	0 - 1	oui
	non identifié	S	-	-	-	-	limitée
mousse	non identifié	S	-	-	-	-	limitée

^a Ne sont pas évoquées dans ce tableau les zones odorantes associées aux défauts terreux des vins de Pinot noir

^b CS : Cabernet Sauvignon, M : Merlot, S : Sémillon, G : Gamay, PN : Pinot noir, C : Chenin

^c Références : (7)

Tableau 1 : Principaux composés volatils à odeur fongique et/ou moisi terreuse fréquemment mis en évidence dans des moûts et des vins issus de vendanges altérées.

La plupart de ces molécules sont dégradées au cours de la fermentation alcoolique en des composés beaucoup moins odorants, notamment la 1-octen-3-one et le 2-méthylisobornéol (MIB), et ne polluent donc pas l'arôme des vins. Par contre, les teneurs en fenchol et fenchone évoluent peu au cours de la fermentation alcoolique mais ces composés restent dans les vins à des concentrations inférieures au seuil de perception olfactive (6). Ils ne sont donc pas responsables de défauts terreux dans les vins.

1.2. Etude des propriétés physico-chimiques de la (-)-géosmine

La (-)-géosmine présente des seuils de perception très faible, de l'ordre de 10 ng/L dans l'eau, de 40 ng/L en solution modèle de composition proche du vin, de 40-50 ng/L dans un vin blanc et de 50-80 ng/L dans un vin rouge (seuils déterminés à la Faculté d'Oenologie de Bordeaux).

Ce composé est peu dégradé au cours de la fermentation alcoolique, seulement 20% dégradés en 2 semaines. Il est également relativement stable en cours de conservation, puisqu'il faut environ 2 mois à 20°C pour noter une diminution de 50% de la teneur initiale, et 8 mois à 10°C. La température est donc un paramètre déterminant dans la dégradation chimique de la géosmine dans le vin.

Vu la stabilité de ce composé, de nombreux essais de traitements curatifs ont été réalisés afin d'éliminer la géosmine dans les vins (Tableau 2). Le lait entier permet d'éliminer jusqu'à 60% des teneurs en géosmine d'un vin et l'huile de pépin de raisin jusqu'à 80%. Les traitements aux corps gras présentent donc une bonne efficacité vis-à-vis de la géosmine. Cependant, à l'heure actuelle, ils ne sont pas autorisés en œnologie. De plus, un traitement thermique à 70°C pendant 24 heures en bouteille fermée conduit à la dégradation de 80% de la géosmine. La volatilisation sous flux d'azote ou d'argon a également été envisagée, à différentes températures, mais n'a donné aucun résultat satisfaisant.

	Traitements			
	Lait entier (1,5l/hl de vin)	Huile de pépins de raisin (0,5l/hl de vin)	Chauffage (24h à 70°C)	Entraînement par un gaz (N ₂ à 3l/l de vin ; 1h à 25°C)
Géosmine (ng/l)				
avant traitement	290	320	700	310
après traitement	120	70	100	280
Efficacité	58.6%	78.1%	85.7%	9.7%

Tableau 2 : Efficacité de traitements curatifs sur les teneurs en géosmine retrouvées dans les vins

Malgré une efficacité relative, ces traitements curatifs ne sont pas sélectifs vis-à-vis de la géosmine et engendrent des pertes d'arômes importantes dans les vins traités. Ils ne constituent donc qu'une mesure d'urgence et pas une solution durable. La maîtrise de ce problème passe donc par la prévention.

II. Origine de la géosmine, un composé responsable d'un arôme terreux dans les vins

II.1. Caractérisation des microorganismes associés à la genèse de géosmine au vignoble

L'origine biologique de la géosmine est attestée depuis les travaux de Gerber et Lechevalier (8). Ce composé a été initialement mis en évidence dans des cultures de bactéries Actinomycètes (*Streptomyces* sp.), puis sa production par des algues bleues et diverses espèces de *Penicillium* sp. a été démontrée (9-14).

La géosmine n'a jamais été détectée dans les raisins sains issus de parcelles touchées par ce problème, ce qui signifie que la présence de ce composé est systématiquement associée à la pourriture des raisins. A partir d'octobre 1999, de nombreux isollements de microorganismes ont donc été effectués sur des raisins sains et sur des raisins touchés par la pourriture issus de nombreuses parcelles du vignoble bordelais, du Val de Loire, de Bourgogne et du Beaujolais concernées par le problème de géosmine et de cépages blancs et noirs (Cabernet Sauvignon, Sémillon, Gamay, Chenin, Pinot noir). La microflore des baies a été analysée et l'aptitude des microorganismes isolés à produire de la géosmine a été évaluée (15). Les principaux suspects pouvant être à l'origine de la genèse de géosmine au vignoble ont été caractérisés grâce aux outils de la biologie moléculaire.

II.1.a. Analyse de la microflore des grappes

L'analyse de la microflore des grappes présentant une odeur terreuse due à la géosmine montre que le genre *Penicillium* est bien représenté (Tableau 3). De nombreuses espèces sont ponctuellement présentes, avec moins de 5 isolats par parcelle, suivant le site et l'année. Il s'agit de *P. thomii*, *P. purpurogenum*, *P. glabrum*, *P. brevicompactum* et *P. carneum*. Quel que soit le site, aucun d'entre eux n'est retrouvé de manière systématique durant les 3 années suivies. En revanche, une seule espèce, *P. expansum*, caractérisée par biologie moléculaire (16), est toujours retrouvée sur les grappes contenant de la géosmine, sur toutes les parcelles concernées et durant toutes les années de prélèvement, avec en moyenne 5 à 10 isolats par parcelle pour les 4 sites bordelais étudiés de 1999 à 2004 et des fréquences élevées dans les autres vignobles français.

Quelques isolats de *Streptomyces* sp. appartenant à 3 espèces majoritaires ont été ponctuellement retrouvés sur les parcelles, mais la présence d'une espèce de *Streptomyces* sp. n'a jamais été répétée tous les ans sur un même site (Tableau 3).

B. cinerea, l'agent de la pourriture grise, est omniprésent et se trouve en quantité relativement abondante tous les ans et sur tous les sites étudiés, avec plus de 10 isolats par parcelle (Tableau 3).

MICROORGANISMES	BORDELAIS				BEAUJOLAIS			BOURGOGNE		VAL DE LOIRE			
	M 1 ¹	M 2	S 1	S 2	BJ 1	BJ 2	BG 1	BG 2	VL 1	VL 2	VL 3	VL 4	
	1999 - 2004	1999 - 2004	1999 - 2002	1999 - 2001	2002	2002	2004	2002 - 2005	2005	2002	2002 - 2005	2002	2004
<i>P. expansum</i>	+++ ²	+++	+++	++	+++	+++	+	++	+	+++	++	+++	+
<i>P. thomii</i>	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
<i>P. purpurogenum</i>	-	+	-	-	-	-	++	-	-	+	-	-	+
<i>P. glabrum</i>	-	-	+	-	-	-	+	++	+	-	-	++	-
<i>P. brevicompactum</i>	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-
<i>P. carneum sect roqueforti</i>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total <i>Penicillium</i> spp.	++	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
<i>S. coelicolor</i> ou <i>S. lividans</i>	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
<i>Streptomyces griseus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
<i>Streptomyces flavogriseus</i>	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+
Autres <i>Streptomyces</i> spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+
Total <i>Streptomyces</i> spp.	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	++	++	++
<i>Botrytis cinerea</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++	+++	+++

¹ M1 et M2 : sites du Médoc, Cabernet Sauvignon ; S1 et S2 : sites du Sauternais, Sémillon ; BJ1 et BJ2 : sites du Beaujolais, Gamay ; BG1 : site de Bourgogne, Pinot noir ; VL1 à VL4 : sites du Val de Loire, Gamay en 2002 et 2005, Chenin en 2004

² - : microorganisme non isolé ; + : peu d'isolats (<5) ; ++ : quelques isolats (5-10) ; +++ : grand nombre d'isolats (>10)

Tableau 3 : Principaux microorganismes retrouvés sur des grappes pourries contenant de la géosmine et prélevées dans 4 régions viticoles françaises

De nombreux champignons et levures sont également présents sur les baies saines. Parmi les moisissures, nous avons rencontré le plus fréquemment *Aureobasidium pullulans* et plusieurs espèces d'*Alternaria* spp. *B. cinerea*, *Cladosporium* sp. et *Epicoccum nigrum* sont également bien représentés. Parmi les levures observées, *Rhodotorula* sp. est systématiquement retrouvée. D'autres champignons sont révélés plus ponctuellement : *Penicillium* spp., *Aspergillus niger*, *Coniothyrium* sp., *Phoma* sp., *Cephalosporium* sp., *Pestalotia* sp. et *Chaetomium* sp.

II.1.b. Aptitude des microorganismes à produire la géosmine

Les potentialités de production de la géosmine par les représentants de la microflore précédemment mis en évidence ont ensuite été évaluées.

Aucune des souches de *B. cinerea* testées ne produit la géosmine, mais certains isolats synthétisent un autre composé à odeur terreuse et camphrée. Parmi les *Penicillium*

spp. isolés, seuls les représentants de 2 espèces phénotypiquement caractérisées produisent de la géosmine. Il s'agit de *P. expansum*, retrouvé sur tous les sites, et de *P. carneum*, ponctuellement retrouvé. Les autres *Penicillium* spp. isolés ne produisent pas la géosmine, malgré leur aptitude à synthétiser des odeurs variées (champignon, cave). Les *Streptomyces* spp., isolés très ponctuellement des baies pourries provenant des différentes parcelles étudiées, produisent l'odeur terreuse caractéristique de la géosmine. En revanche, aucun des autres champignons testés ne produits de géosmine.

Ainsi, l'analyse de la microflore des baies de raisin saines ou pourries a permis de mettre en évidence l'omniprésence et l'abondance de *B. cinerea* sur les grappes contenant de la géosmine. De plus, en association avec ce dernier, *P. expansum* est systématiquement retrouvé tous les ans sur toutes les parcelles concernées par le problème de géosmine. Ce champignon et la bactérie du sol *Streptomyces* sp. sont capables de produire la géosmine. L'étude de leur métabolisme de production de la géosmine a donc débuté, en fonction du temps et du milieu de culture.

II.1.c. Etude préliminaire du métabolisme de production de *P. expansum* et de *Streptomyces* sp., potentiellement responsables de la genèse de la géosmine au vignoble

Cinq types de milieux ont été inoculés avec des isolats de *P. expansum* ou de *Streptomyces* sp. : les milieux Malt Agar (MA) et "jus de raisin" (JR), à des pH allant de 3 à 7, des grappes entières, des baies de raisin et des rafles.

Les bactéries filamenteuses produisent la géosmine sur milieu MA et JR à pH supérieur à 6, mais ne peuvent se développer sur le substrat acide que constitue la baie, le jus de raisin ou la rafle (pH 3-4). L'hypothèse qu'ils puissent être impliqués dans la genèse de la géosmine au vignoble, se produisant au moment de la maturité du raisin, peut donc être écartée. Les travaux se sont donc concentrés sur *P. expansum*.

Paradoxalement, *P. expansum* se développe et produit de la géosmine sur milieu MA, quel que soit le pH, alors que sur jus de raisin sain et sur baies, le champignon croît mais la synthèse de géosmine n'est pas possible. Le métabolisme de production de ce composé par *P. expansum* a donc été étudié.

II.2. Etude du métabolisme de production de la géosmine par *P. expansum*

Dans un premier temps, l'étude métabolique s'est intéressée à l'influence de l'environnement et de la composition du jus de raisin sur la production de géosmine par *P. expansum*. Pour cela, le champignon a d'abord été ensemencé sur boîtes de Petri contenant les milieux Malt Agar (MA) ou jus de raisin (JR) en faisant varier quelques facteurs

abiotiques, à savoir le niveau d'intensité lumineuse, de température et de concentration en oxygène, afin de se placer dans les conditions les plus proches possibles de celles observées au vignoble. Ensuite, divers traitements ont été appliqués sur des jus de raisin afin d'évaluer leur éventuelle influence, activatrice ou inhibitrice, sur la production de géosmine par *P. expansum* (pH, polyphénols, acides gras), puis nous avons particulièrement étudié l'incidence de la composition azotée du milieu de culture. Enfin, une approche biochimique de la voie de biosynthèse de la géosmine, non développée dans cet article, a été entreprise.

Parmi les facteurs environnementaux, seule la concentration en oxygène présente un effet stimulateur de la genèse de géosmine par *P. expansum* sur milieu MA, mais aucun des facteurs liés à l'environnement n'a d'effet direct sur le déclenchement de la production de géosmine du champignon.

Parmi les composantes du raisin, l'acide linoléique, un acide gras présent dans la praine du raisin, permet à *P. expansum* de produire la géosmine. De plus, des teneurs élevées en acides aminés, similaires à celles d'un jus de raisin sain, dans un milieu modèle permettent le développement du *Penicillium* mais inhibent la synthèse de géosmine, alors que le niveau de concentration en ion ammonium dans la baie favorise cette production, et ce de manière proportionnelle à la quantité ajoutée.

II.3. Influence de Botrytis cinerea sur la production de géosmine par P. expansum

L'observation du phénomène au vignoble a permis de mettre en évidence que les grappes pourries contenant de la géosmine présentaient systématiquement, en association avec *P. expansum*, des foyers de pourriture dus à *B. cinerea*. Par ailleurs, il a été démontré que la carence azotée du jus de raisin avait un effet inducteur sur la production de géosmine par *P. expansum*, carence que *B. cinerea* est capable de générer lors de son développement sur la baie.

Nous nous sommes donc intéressés à l'influence de *B. cinerea* sur la synthèse de géosmine par *P. expansum* à travers deux démarches complémentaires, en étudiant d'abord le complexe *B. cinerea/P. expansum* dans des expériences de co-inoculations sur raisin, rafle ou jus de raisin, puis en évaluant plus précisément le rôle du métabolisme de *B. cinerea* sur le raisin.

II.3.a. Importance de l'association B. cinerea / P. expansum dans la genèse de géosmine sur jus et broyat de raisin

De nombreuses expériences de co-inoculations des champignons *B. cinerea* et *P. expansum* ont été réalisées sur grappe entière, sur baies, sur rafle, sur broyat de raisin et

sur jus de raisin. Différents cépages, isolats, conditions environnementales et délais entre inoculations ont été testés.

Nous avons pu démontrer l'aptitude de *P. expansum* à synthétiser la géosmine sur jus et broyat de raisin préalablement cultivés par *B. cinerea*. Toutes les souches de *P. expansum* issues de différents sites sont capables de générer le composé terreux après développement de *B. cinerea*, mais à l'inverse, seuls 22% des souches de *B. cinerea* prélevées sur une parcelle du Beaujolais en 2004 et testées en association ont permis de modifier la composition du jus de raisin afin que *P. expansum* puisse y produire de la géosmine (17).

Différents métabolites de *B. cinerea* (acide gluconique, glycérol, mannitol, galactose) ont ensuite été supplémentés à des milieux de cultures à base de jus de raisin. Un effet inducteur du mannitol sur la genèse de géosmine est clairement démontré pour plusieurs souches de *P. expansum*, et de manière proportionnelle à la quantité ajoutée. L'effet inhibiteur des acides aminés du jus de raisin a également pu être confirmé.

L'action essentielle de *B. cinerea* s'interprète donc par la dégradation des acides aminés, inhibiteurs de cette genèse. De plus, le mannitol, un polyol produit par *B. cinerea*, permet également à *P. expansum* de produire ce composé. Il pourrait donc avoir un rôle stimulateur sur la genèse de géosmine.

II.3.b. Interprétation de la variabilité intraspécifique de *B. cinerea* dans son aptitude à préparer le raisin pour la synthèse de géosmine par *P. expansum*

Après avoir mis en évidence le rôle joué par l'association entre les deux champignons que sont *B. cinerea* et *P. expansum* dans la genèse de la géosmine au vignoble, nous avons démontré que le métabolisme de certaines souches de *B. cinerea* pouvait influencer de manière positive sur l'expression de géosmine par *P. expansum*. Nous avons donc cherché à savoir quelle(s) différence(s) pouvaient exister entre les quelques souches de *B. cinerea* dites "favorables" à la genèse de géosmine par *P. expansum* sur jus de raisin (nommées "bot +") et celles dites "non favorables" (nommées "bot -").

Les concentrations en acides aminés, ion ammonium et mannitol de plusieurs jus de raisin pré-cultivés avec des souches "bot +" ou "bot -" ont d'abord été comparées, mais aucune différence n'a été observée.

Nous avons ensuite démontré que les souches "bot -" synthétisent un composé inhibiteur de la production de géosmine par *P. expansum*, et des étapes de purification ont permis de déterminer quelques caractéristiques de ce(s) composé(s) inhibiteur(s) : il(s)

est(sont) thermorésistant(s), acide(s), de taille comprise entre 30 et 50 kDa et de nature polysaccharidique. La caractérisation de ce(s) composé(s) se poursuit.

Ces résultats suggèrent donc que toutes les souches de *B. cinerea* possèdent la capacité à "préparer" le jus de raisin, en en modifiant spécialement le contenu aminé, pour permettre à *P. expansum* de produire la géosmine mais que la grande majorité des souches de *B. cinerea* synthétisent simultanément un inhibiteur de cette genèse.

Conclusions

En conclusion, ce travail a contribué à la caractérisation de défauts organoleptiques fongiques et terreux retrouvés dans les raisins, les moûts et les vins grâce aux nouveaux outils d'analyse chromatographique et à la sensibilité accrue des détecteurs de masse. Si la fermentation alcoolique permet la dégradation de certains de ces composés, d'autres défauts, notamment ceux liés à la présence de la (-)-géosmine, persistent et altèrent durablement la qualité organoleptique des vins. Il a permis de démontrer l'origine microbienne de certains de ces défauts et révélé ainsi l'émergence dans nos vignobles de climats tempérés d'associations entre *Botrytis cinerea* et diverses espèces fongiques considérées jusqu'à présent comme marginales, notamment *P. expansum*.

Une étude approfondie de l'origine de la (-)-géosmine a permis d'établir la présence systématique du complexe *B. cinerea* - *P. expansum* sur les grappes contenant ce composé et la possibilité de sa genèse, sur jus et broyat de raisins, par développement successif de souches de *B. cinerea* puis de *P. expansum*. Des éléments d'explication du phénomène ont pu être apportés, qui trouvent notamment leur origine dans la carence en azote aminé du jus de raisin due au développement de *B. cinerea*. Ce travail a également mis en évidence une variabilité intraspécifique des populations de souches de *B. cinerea* dans leur aptitude à synthétiser une macromolécule polysaccharidique capable de réprimer la genèse de géosmine par *P. expansum*.

Une connaissance accrue non seulement de la nature chimique des défauts organoleptiques et de leur origine mais aussi de l'écologie des espèces fongiques au vignoble paraît indispensable dans l'avenir pour faire face le plus rapidement et le plus efficacement possible à ces problèmes.

Références

- (1) Bayonove, C. Incidences des attaques parasitaires fongiques sur la composante qualitative du raisin et des vins. *Revue Française des Oenologues* **1989**, 116, 29-39.
- (2) Ribéreau-Gayon, J.; Peynaud, E. *Traité d'Oenologie - Tome 1 : Maturation du raisin, fermentation alcoolique, vinification*; Béranger: Paris, 1964.

- (3) Gerber, N. N. Volatile substances from actinomycetes: their role in the odor pollution of water. *CRC Crit. Rev. Microbiol.* **1979**, *7*, 191-214.
- (4) Darriet, P.; Pons, M.; Lamy, S.; Dubourdieu, D. Identification and quantification of geosmin, an earthy odorant contaminating wines. *J. Agric. Food Chem.* **2000**, *48*, 4835-4838.
- (5) Darriet, P.; Lamy, S.; La Guerche, S.; Pons, M.; Dubourdieu, D.; Blancard, D.; Steliopoulos, P.; Mosandl, A. Stereodifferentiation of geosmin in wine. *Eur. Food Res. Technol.* **2001**, *213*, 122-125.
- (6) La Guerche, S.; Pons, M.; Darriet, P. Étude de composés volatils associés à la pourriture des raisins et responsables de défauts olfactifs dans les moûts et les vins. In *Œnologie 2003 - 7th International Symposium of Enology*; A. Lonvaud; G. De Revel and P. Darriet, Eds.; Tec & Doc: Paris, 2003; pp 433-436.
- (7) La Guerche, S. Recherches sur les déviations organoleptiques des moûts et des vins associées au développement de pourritures sur les raisins - étude particulière de la géosmine. PhD thesis, University of Victor Segalen Bordeaux 2, 2004.
- (8) Gerber, N. N.; Lechevalier, H. A. Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes. *Appl Microbiol* **1965**, *13*, 935-938.
- (9) Blevins, W. T.; Schrader, K. K.; Saadoun, I. Comparative physiology of geosmin production by *Streptomyces halstedii* and *Anabaena* sp. *Water Science and Technology* **1995**, *31*, 127-133.
- (10) Saadoun, I.; Schrader, K. K.; Blevins, W. T. Identification of geosmin as a volatile metabolite of *Anabaena* sp. *J Basic Microbiol* **2001**, *41*, 51-55.
- (11) Pisarnitskii, A. F.; Egorov, I. A. Low molecular weight metabolites produced by various *Penicillium* species. *Prikl Biokhim Mikrobiol* **1988**, *24*, 760-764.
- (12) Mattheis, J. P.; Roberts, R. G. Identification of geosmin as a volatile metabolite of *Penicillium expansum*. *Appl. Environ. Microbiol.* **1992**, *58*, 3170-3172.
- (13) Börjesson, T. S.; Stollman, U. M.; Schnürer, J. L. Off-odorous compounds produced by molds on oatmeal agar: identification and relation to other growth characteristics. *J. Agric. Food Chem.* **1993**, *41*, 2104-2111.
- (14) Larsen, T. O.; Frisvad, J. C. Characterization of volatile metabolites from 47 *Penicillium* taxa. *Mycology Research* **1995**, *99*, 1153-1166.
- (15) La Guerche, S.; Blancard, D.; Chamont, S.; Dubourdieu, D.; Darriet, P. Origine de la géosmine, composé responsable d'un arôme terreux dans les vins - étude des microorganismes impliqués et de leur métabolisme. In *Œnologie 2003 - 7th International Symposium of Enology*; A. Lonvaud; G. De Revel and P. Darriet, Eds.; Tec & Doc: Paris, 2003; pp 22-25.
- (16) La Guerche, S.; Garcia, C.; Darriet, P.; Dubourdieu, D.; Labarère, J. Characterization of *Penicillium* species isolated from grape berries by their internal transcribed spacer (ITS1) sequences and by gas chromatography-mass spectrometry analysis of geosmin production. *Curr. Microbiol.* **2004**, *48*, 405-411.
- (17) La Guerche, S.; Chamont, S.; Blancard, D.; Dubourdieu, D.; Darriet, P. Origin of (-)-Geosmin on Grapes: On the Complementary Action of Two Fungi, *Botrytis Cinerea* and *Penicillium Expansum*. *Antonie Van Leeuwenhoek* **2005**, *88*, 131-139.