

L'azote s'amuse

Jean-François Le Maréchal et Romain Barbe

Résumé Montrer la science sous un aspect attractif lors des manifestations grand public nécessite plusieurs conditions qui sont présentées ici dans le cas de spectaculaires démonstrations utilisant l'azote liquide. L'étonnement obtenu en allant à l'encontre d'idées erronées permet de faire comprendre la différence entre chaleur et température et de montrer quelques propriétés du changement d'état liquide/gaz. Le comportement de quelques objets courants à basse température illustre certaines de leurs propriétés tout en montrant des phénomènes inattendus. C'est autant de sources de questions et de remises en question qui permettent aux scientifiques d'échanger avec le public, qu'il soit enfant ou adulte.

Mots-clés Azote liquide, diffusion de la science, conception, chaleur, température.

Abstract Nitrogen plays around

Showing attractive aspects of science to everybody is a challenge that requires several conditions that are described here in the case of the use of liquid nitrogen. One of these conditions is the astonishment that can arise by fighting against misconceptions about heat and temperature and showing the properties of liquid/gas change of state. For example, the behaviour of common objects at low temperature illustrates several of their properties while showing unexpected phenomena. Such phenomena can help scientists to communicate with non scientists of all ages on the basis of questioning the properties of matter in unusual situations.

Keywords Liquid nitrogen, public demonstration, misconception, heat, temperature.

L'azote s'amuse, atelier réalisé pendant plusieurs années lors de la Fête de la science à l'École Normale Supérieure de Lyon, consiste à montrer des expériences spectaculaires qui utilisent l'azote liquide tout en mettant en jeu quelques concepts physico-chimiques de base. S'affirme alors un point de vue quant à la façon de présenter la science auprès d'un très large public et de susciter l'intérêt de ce dernier (figure 1).



Figure 1 - Deux classes primaires à l'atelier L'azote s'amuse lors de la Fête de la science à l'ENS de Lyon.

Nous avons observé que de nombreux ateliers montrant des effets aussi spectaculaires que la supraconductivité, les alliages à mémoire de forme, etc. captaient l'intérêt du public essentiellement à cause de l'azote liquide utilisé pour attein-

dre de basses températures. Un atelier sur l'azote liquide s'imposait. Son succès a conduit à sa reconduction annuelle, attirant chaque année pendant quelques jours des milliers de spectateurs autour d'une activité scientifique dont le langage peut aisément s'adapter à tout âge et tout niveau scientifique.

L'objectif de cet article est de présenter d'une part différentes expériences simplement réalisables, comme on peut les voir au Palais de la découverte ou réalisées par différentes associations. L'azote s'amuse, certes, mais il s'agit aussi d'autre part de décrire le message scientifique qui a été élaboré à destination du grand public en accompagnement de ces expériences. Autant les expériences sont plus ou moins déjà décrites dans différentes sources, autant leurs relations avec les sujets qui concernent le public sont originales. Le regroupement thématique adopté ici ne reflète pas nécessairement l'ordre variable des présentations. Les usages de l'azote liquide et ses précautions d'utilisation lors de l'atelier sont précisés en fin d'article.

Nous utilisons la nomenclature courante azote, et non diazote comme c'est de rigueur dans les lycées français, parce qu'à aucun moment il n'est question de distinguer les notions d'élément chimique, d'atome ou de molécule d'azote qui rendraient cette précision pertinente.

A l'encontre d'idées erronées

La fascination du public pour des observations surprenantes nous permet dès le début de l'atelier de remettre en question des idées bien établies sur les liquides, la chaleur ou la température, et les changements d'état. Les idées qui sous-tendent cette première partie convergent vers un questionnement sur le sens des mots utilisés à la fois dans le vocabulaire courant et en science, tout cela en harmonie avec la magie qui s'opère à chacune des observations.

L'azote : un liquide froid

Le remplissage du vase Dewar en présence des spectateurs introduit magistralement la séance. Le transfert du liquide commence toujours par la production d'un énorme brouillard givrant qui permet de débiter par un bel effet. « Ça fume », entend-on ! Non, ce n'est pas de la fumée. La fumée, c'est de la poussière. Ici, l'azote se vaporise au contact du récipient, ce qui génère une grande quantité de gaz froid. L'air humide est refroidi, et l'eau dont il est chargé se liquéfie en microgouttelettes, voire se condense en microcristaux de glace.

Après quelques instants, quand la canne de transfert et le vase Dewar sont suffisamment froids, la formation de brouillard cesse. Il apparaît que l'azote est bien un liquide. Il se verse, par exemple dans un récipient en polystyrène dans lequel on engage le public à tremper sa main. Même les plus intrépides ont peur. On peut laisser sa main dans l'azote liquide pendant une petite seconde si elle est sèche, deux fois plus si elle est mouillée. Il ne faut bien sûr ni forcer quelqu'un à effectuer ce geste qui n'est pas sans danger, ni attendre la douleur pour retirer la main.

La conclusion est acceptée : l'azote est bien un liquide froid. Annoncer que sa température est de -196 °C n'est généralement pas suffisant. Il faut procéder par étapes et interroger les plus jeunes sur les objets froids qu'ils connaissent. L'intérieur du réfrigérateur ? $+4\text{ °C}$. La neige ? -10 °C . La glace au pôle Nord ? -40 °C ; alors -196 °C impressionne vraiment.

L'azote : un liquide bouillant

On propose de faire bouillir de l'azote. Une bouilloire qui siffle quand l'eau bout attend près d'un camping gaz. On la remplit partiellement d'azote liquide en s'aidant d'un entonnoir, c'est normal pour un liquide ! On positionne le bouchon-sifflet. On l'approche du camping gaz mais déjà elle siffle. « Ça y est, l'azote est bouillant ! ». C'est bouillant ou c'est froid ?

Que veut dire bouillant pour tout un chacun ? Cela veut dire 100 °C , c'est donc chaud, très chaud, bouillant ! Non, pour le physicien, bouillir, c'est autre chose. C'est passer du liquide au gaz à la pression atmosphérique [1]. Dans la suite de la présentation, on ne parle plus de l'azote liquide, mais de l'azote bouillant.

L'idée préconçue relative au mot bouillant a pour origine la typicalité de l'eau. Ce terme emprunté à la psychologie traduit que, pour la plupart des personnes, l'eau est le corps le plus représentatif de l'état liquide, de même que le moineau est plus représentatif des oiseaux que l'autruche et que l'automobile est plus un véhicule qu'un traîneau. D'aucun en déduit que tout ce qui bout est donc à 100 °C !

Plus on chauffe, plus on fait de glace

La partie métallique d'un marteau est plongée dans l'azote qui bout de plus belle. On met à profit le temps nécessaire à la thermalisation de l'outil pour apporter des explications sur les raisons de cette ébullition renforcée. On allume alors un camping gaz et l'on met la partie métallique du marteau dans la flamme. Elle se couvre de givre et plus on « chauffe », plus le givre s'accumule. Même si l'épaisseur du givre reste faible, le public admet facilement qu'il s'agit de glace ; mais quelle est son origine ? Il s'agit bien sûr de l'eau de la combustion, spectaculairement mise en évidence

parce que la relation entre la chaleur et la température n'est pas comprise par le grand public.

Dès que le givre commence à disparaître, le présentateur applique le fer du marteau resté longtemps dans la flamme sur son avant-bras nu en imitant le bruit de la peau qui grille. Quand le givre commence à fondre, on approche zéro degré. Ce n'est pas si chaud, même après avoir séjourné dans la flamme !

Cette mauvaise compréhension de la relation entre chaleur et température est alors exploitée. Chauffer relève du transfert énergétique, mais dire qu'un objet est chaud implique la notion de température. Vitz *et al.* ont fait constater à leurs étudiants qu'une tasse de café bouillant versée dans un litre d'azote liquide provoque moins d'évaporation que l'introduction d'un glaçon (à 0 °C) d'un kilogramme [2]. Le café transfère donc moins de chaleur que le glaçon alors que sa température est supérieure.

Liquide et gaz

Du liquide au gaz

L'objectif est de montrer l'énorme variation de volume lors du passage du liquide au gaz. Pour cela, on verse de l'azote bouillant dans un erlenmeyer que l'on couvre d'un ballon de baudruche. Le passage du liquide au gaz provoque une augmentation du volume d'un facteur 680 dans le cas de l'azote à pression ordinaire. Le ballon se gonfle jusqu'à se décrocher de l'erlenmeyer.

Cette différence de volume est mise à profit dans les méthaniers qui transportent le méthane non sous forme de gaz, mais de liquide. Ces derniers sont donc presque mille fois moins longs pour la même capacité. Un méthanier s'étendant déjà sur plusieurs centaines de mètres, on imagine la taille de l'embarcation qui devrait transporter un gaz et non un liquide ! Le méthane bouillant laisse échapper du gaz qui est récupéré et brûlé pour faire avancer le cargo. Par ailleurs, il y a beaucoup à dire sur le fait que l'évaporation et l'ébullition empêchent le réchauffement du liquide bouillant.

Du gaz au liquide

Le passage du gaz au liquide se montre aussi à l'aide d'un ballon de baudruche que l'on a gonflé à la bouche. Avec un ballon long, de préférence à un ballon sphérique, l'expérience est plus impressionnante. Plongé dans le récipient en polystyrène contenant l'azote bouillant, son volume diminue. Dans un premier temps, le gaz se contracte car sa température baisse ; il se forme ensuite un liquide, ce qui se voit par transparence si on sort le ballon du récipient en polystyrène. Rapidement réchauffé, le ballon reprend sa forme initiale.

La loi du gaz parfait interprète bien la première phase de diminution du volume. Puis la température est suffisamment basse pour que l'air se condense. Attention, ce n'est pas la condensation de l'oxygène puis ensuite celle de l'azote qui est observée : cela mettrait en défaut l'utilisation des diagrammes binaires (ici N_2/O_2). Puisqu'il n'y a pas d'azéotrope pour ce mélange, la température de liquéfaction est entre -183 °C pour O_2 et -196 °C pour N_2 . On ne pourrait d'ailleurs pas condenser de l'azote liquide avec de l'azote bouillant, pas plus qu'on ne peut, à pression atmosphérique, geler de l'eau avec de la glace fondante.

L'oxygène liquide

Pour produire de l'oxygène liquide, il est préférable d'utiliser de l'oxygène gazeux en bouteille sous pression. On montre par barbotage dans de l'eau que du gaz sort du cylindre relié par un flexible à une pipette. Cette dernière est plongée dans un tube à essais immergé dans un Dewar rempli d'azote bouillant. Le débit d'oxygène doit être ajusté de façon à obtenir rapidement quelques millilitres d'oxygène liquide, sans réchauffer le tube à essais par un flux important d'oxygène à température ambiante. On doit entendre rapidement le barbotage du gaz O_2 dans le liquide O_2 . L'utilisation d'un vase de Dewar dont le verre n'a pas été argenté permet d'observer l'accumulation dans le tube d'un liquide bleu ciel : l'oxygène liquide (figure 2).



Figure 2 - De l'oxygène liquide en train de se condenser.

Après quelques minutes, on obtient 1 ou 2 cm^3 de liquide qui se met rapidement à bouillir. Le gaz qui s'échappe étant de l'oxygène gazeux, il est possible de raviver la flamme d'une bûchette incandescente en l'approchant de l'extrémité du tube. On peut aussi, si les conditions de sécurité sont respectées [3], laisser tomber une allumette enflammée dans le liquide à $-183\text{ }^\circ\text{C}$. La flamme qui jaillit est spectaculaire. Une combustion extrêmement vive a lieu, bien que l'oxygène soit très froid.

Si l'on peut condenser de l'oxygène avec de l'azote bouillant, c'est que les températures d'ébullition respectives le permettent. Une échelle de température aide à convaincre que l'on n'aurait pas pu condenser de l'azote avec de l'oxygène liquide. L'oxygène solide existe aussi, mais en dessous de $-218\text{ }^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique, ce que ne permet pas d'atteindre l'azote bouillant. En revanche, l'argon gèle ($\theta_{\text{fus}} = -189\text{ }^\circ\text{C}$), de même que le dichlore ($\theta_{\text{fus}} = -101\text{ }^\circ\text{C}$), l'ammoniac ($\theta_{\text{fus}} = -78\text{ }^\circ\text{C}$), etc. Peu de corps sont liquides à $-196\text{ }^\circ\text{C}$!

Refroidir quelques objets courants

Quelques objets ont été sélectionnés pour être montrés dans des situations inhabituelles grâce à l'azote liquide. De telles expériences illustrent les propriétés des objets eux-mêmes ou des matériaux qui les composent.

Le caoutchouc

Le refroidissement d'un ruban de caoutchouc permet de montrer les limites de l'élasticité des polymères. Quand on passe en dessous d'une température de transition vitreuse, ceux-ci perdent leur élasticité et deviennent fragiles (figure 3).

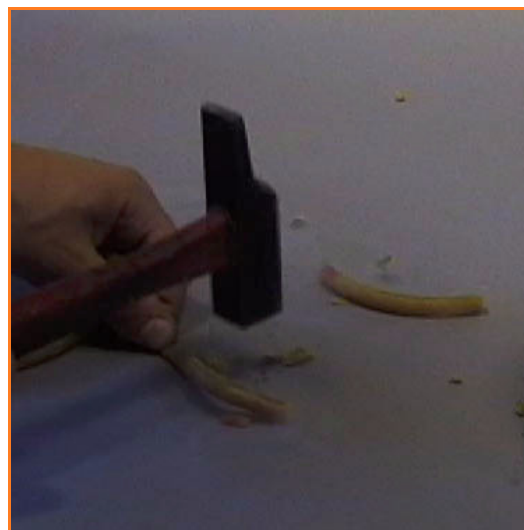


Figure 3 - Éclatement du caoutchouc à basse température.

La présentation consiste à faire casser un large ruban en caoutchouc par un jeune spectateur. Ce n'est pas facile à température ambiante. Plongé dans l'azote bouillant et récupéré avec une pince à creuset, on dispose d'un ruban figé facilement brisable. Donner un petit coup de marteau s'avère nécessaire car si le caoutchouc est pris avec la main, il se réchauffe suffisamment pour redevenir localement élastique.

Une application de cette propriété cassante du caoutchouc froid est l'ébarbage industriel des pièces moulées. Celles-ci sont placées dans un tambour refroidi à l'azote liquide où les barbes se brisent par frottement.

L'eau

On peut illustrer la protection thermique offerte par un igloo avec un ballon de baudruche d'une dizaine de centimètres de diamètre rempli d'eau et immergé dans l'azote bouillant. Il faut tourner le ballon de temps en temps sur lui-même pour qu'il se forme une couche de glace raisonnablement homogène. Au bout d'une à deux minutes, le ballon est retiré de l'azote liquide, le film de baudruche est pelé sommairement, et la glace brisée comme une noix de coco. Après avoir montré qu'il contient de l'eau liquide en son sein, on fait circuler les morceaux de glace (attention toutefois à ne pas toucher la glace lorsqu'elle sort de l'azote bouillant). Le public apprécie toujours de pouvoir toucher.

Bien qu'il soit resté un bon moment dans un liquide à $-196\text{ }^\circ\text{C}$, le ballon d'eau contient encore de l'eau liquide, donc à une température d'au moins $0\text{ }^\circ\text{C}$. Ce pouvoir protecteur de la glace est mis à profit par les Inuits ou par les montagnards en bivouac.

Il apparaît souvent des poches d'air visibles entre la glace et le ballon. Il s'agit d'un phénomène classique d'expulsion des gaz dissous lors de la solidification d'un liquide. Ici, ce gaz est l'air dissous dans l'eau du robinet.

Les végétaux

Toutes sortes de végétaux peuvent être congelés à l'azote bouillant. Les feuilles deviennent cassantes, les pétales de marguerites peuvent être effeuillés à coup de pichenettes. Ces situations peu courantes montrent la dureté du végétal congelé, laquelle s'interprète par la solidification de l'eau qui le constitue.

Une tomate cerise est une bonne candidate au refroidissement. En effet, elle éclate rapidement parce que l'eau solide prend plus de place que l'eau liquide (l'iceberg flotte), et que la peau de ce fruit n'est pas extensible à basse température. Une fois gelée, la tomate rebondit comme une bille en verre et se casse. Les enfants aiment en toucher les débris.

L'eau savonneuse et la fontaine de bulles

La fin du « spectacle » approche, le public se lasse des interprétations scientifiques mais reste en attente de la suite. La fontaine de bulles a toujours son « petit succès ». De l'eau chaude est mélangée à une bonne quantité de savon liquide dans un erlenmeyer. De l'azote bouillant est alors versé. Il en résulte un volcan de bulles de savon, toujours apprécié. L'agitation avec la main de l'erlenmeyer relance la production de bulles (figure 4).



Figure 4 - Production de bulles à partir d'eau savonneuse et d'azote liquide.

En passant de l'état liquide à l'état gazeux dans l'eau savonneuse, des bulles de savon (gonflées à l'azote) se forment. L'eau tiédie permet une bonne production de gaz, en empêchant qu'elle ne gèle en surface.

La crème glacée en fin de démonstration

Cette conclusion du « spectacle », empruntée à Hervé This [4], requiert un demi-litre de crème aux œufs dans un saladier métallique ; l'azote bouillant est introduit en grande quantité mais progressivement afin d'éviter de congeler la

crème. Une écumoire permet d'agiter l'ensemble tout en circulant dans le public. Ce changement de style achève l'atelier en beauté, et permet éventuellement d'isoler les enfants les plus excités que l'on écarte ainsi de la scène pour obtenir le calme indispensable à une discussion scientifique avec le public.

Certains enfants qualifient la glace obtenue de « chimique » et déprécient le dessert ainsi préparé. La discussion sur ce que signifie chimique est appropriée ici puisqu'il n'est question que de transformations physiques, qu'il s'agisse de la liquéfaction de l'air, de sa distillation, ou de l'utilisation de l'azote liquide.

Utilisation de l'azote liquide

Sécurité

Bien évidemment, l'azote liquide ne s'utilise pas sans précautions afin d'éviter les brûlures par le froid, l'éclatement de récipients ou l'asphyxie.

L'aspect cryogénique est accentué si le contact de la peau a lieu avec une surface métallique ou de verre. Le port d'une blouse, de lunettes et de gants spéciaux s'avère alors nécessaire. Dans le cadre de la présentation, il faut éviter par tous les moyens de renverser de l'azote bouillant sur les vêtements du public. D'un « cataplasme » à - 196 °C résulteraient de graves séquelles identiques à des brûlures. Quand l'enthousiasme des plus jeunes spectateurs se transforme en turbulence, il faut impérativement calmer le public, sans toutefois « refroidir » l'ambiance.

L'éclatement provient rarement des containers d'azote liquide dont la maintenance est confiée à des spécialistes, mais de récipients de taille modeste qui pourraient s'obstruer, volontairement par erreur, ou involontairement par formation d'un bouchon de glace par exemple. On a également rapporté la condensation non prévue de l'argon utilisé pour effectuer un balayage de l'atmosphère contenu dans un récipient refroidi à l'azote liquide. L'explosion d'une grande violence a eu lieu quand le dispositif s'est réchauffé alors qu'il avait été bouché.

Un local mal ventilé ou un véhicule inapproprié sont à proscrire pour entreposer un récipient d'azote liquide. En produisant 680 fois son volume de gaz, l'azote liquide peut rendre l'air d'une pièce irrespirable, en le faisant passer en dessous du niveau toléré de 17 % d'oxygène dans l'air. La perte de 10 L d'azote liquide, normale en quelques jours, ou plus rapidement si elle est accidentelle, entraîne le franchissement de ce seuil d'asphyxie dans un local fermé de 180 m³, soit une salle de classe. Certaines entreprises interdisent même à leurs employés de pénétrer seuls dans un local de stockage d'azote liquide. La ventilation du lieu de la présentation est donc à prendre en compte.

Production et usages

L'azote liquide est produit par distillation fractionnée de l'air liquide, ce dernier résultant du refroidissement de l'air. Une question se pose immédiatement : comment refroidir de l'air au point de le liquéfier ? Un dispositif appelé cryogénérateur est constitué d'une réserve d'hélium gazeux, sous haute pression à température ordinaire, qui est détendu, ce qui abaisse sa température, et donc celle des parois du récipient qui le contient, jusqu'à 73 K. C'est suffisant pour liquéfier l'air qui ruisselle alors sur la surface d'échange

thermique. L'hélium est ensuite comprimé, ce qui le réchauffe au-delà de la température normale. Il est alors refroidi avec de l'eau, toujours à haute pression. Le cycle peut reprendre. Globalement, un travail mécanique permet de déplacer de la chaleur depuis l'air qui se refroidit à l'eau qui se réchauffe. Un tel procédé coûte peu d'énergie et utilise une matière première gratuite et abondante : l'air. A grande échelle, l'air et l'azote liquides sont donc produits à bon compte, ce qui génère une large possibilité d'utilisations.

L'usage de l'azote liquide a été évoqué dans le cours de l'article et concerne le secteur de la cryogénie : cryoébarbage des matériaux mous, cryobroyage des pneus, marquage du bétail, congélation des sols pour construire un mur de glace provisoire afin de creuser en terrain humide, conservation des tissus vivants, surgélation d'aliments fragiles (cela réduit la taille des cristaux de glace qui se formeraient en leur sein), piégeage dans le secteur du vide, effets scéniques, etc. Le faible coût de l'azote liquide autorise son utilisation dans des domaines variés.

Conclusion

Les expériences décrites dans cet article constituent une sélection de ce qu'il est possible de faire avec ce fascinant liquide bouillant. D'autres expériences ont été filmées et sont disponibles sur le site de l'ENS de Lyon [5].

Par exemple, sont illustrés le paramagnétisme de l'oxygène (figure 5), la dureté d'une banane congelée, la mise sous tension d'un filament de tungstène plongé dans l'azote liquide (figure 6), etc.

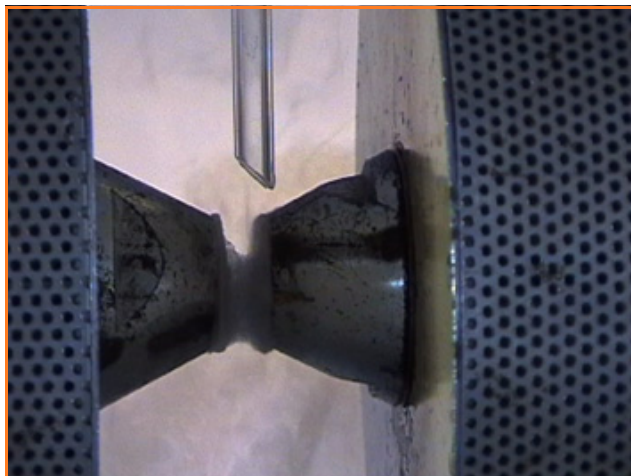


Figure 5 - Oxygène liquide fixé dans l'entrefer d'un aimant.

Des questions d'intendance n'ont pas été abordées ici : le coût de l'azote liquide (le prix de l'eau minérale) et son origine. Le coût par présentation est de 5 à 8 L d'azote bouillant, une tomate cerise et un demi-litre de crème à la vanille UHT ; le ballon de baudruche, l'eau savonneuse et le marteau sont bien sûr recyclés. Cet atelier a été placé pendant des années sous la responsabilité d'étudiants de première et deuxième année de l'ENS de Lyon, c'est-à-dire d'étudiants au niveau bac + 3 et 4. Pour arriver à réaliser une présentation orale de qualité, une formation d'une heure est nécessaire.



Figure 6 - Filament d'une lampe électrique (bulbe de verre retiré) mis sous tension dans de l'azote liquide.

Ce n'est pas de la grande science, mais c'est celle dont les gens ont besoin car elle les interpelle dès qu'elle est présentée de façon ludique. S'il est possible de trouver les bons mots et d'exprimer sa sensibilité scientifique au contact du public, alors on émerveille grâce à la science tout en apportant des connaissances.

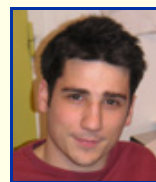
Notes et références

- [1] L'évaporation d'un liquide a lieu à toute température alors que l'ébullition n'est possible qu'à une seule température. Le premier est un phénomène de surface alors que le second intervient au cœur du liquide. Pour cette raison, il se forme des bulles constituées d'un gaz de même nature que le liquide au sein duquel il se forme.
- [2] Vitz E., Schuman M.J., The q/T paradox: which contains more heat, a cup of coffee at 95°C or a liter of ice water?, *J. Chem. Educ., Tested demonstrations*, **2005**, 82(6), p. 858.
- [3] Le tube à essais doit être tenu à bout de bras avec une pince en bois, l'ouverture dirigée vers le haut, en s'assurant que le plafond est largement à plus d'un mètre.
- [4] This H., *Les secrets de la casserole*, Belin, Paris, **1996**, p. 148.
- [5] http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/Entree_par_theme/generalites/Azote/



J.-F. Le Maréchal

Jean-François Le Maréchal¹ (auteur correspondant) est maître de conférences et **Romain Barbe²** est professeur agrégé, doctorant, à l'École Normale Supérieure de Lyon*.



R. Barbe

* ENS LYON, 46 allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07.

¹ Tél. : 04 72 72 80 07. Fax : 04 72 72 80 80.

Courriel : lemarech@ens-lyon.fr

² Tél. : 04 72 72 83 97. Fax : 04 72 72 84 83.

Courriel : romain.barbe@ens-lyon.fr