

# LES POLYMÈRES DE L'URÉE FORMALDÉHYDE

## ENGRAIS AZOTÉS INSOLUBLES

### A NITRIFICATION MÉNAGÉE

par

**L. SOUBIES**

INGÉNIEUR AGRICOLE

et

**R. GADET**

INGÉNIEUR AGRONOME

SERVICE DES RECHERCHES  
AGRONOMIQUES  
DE L'O. N. I. A. (TOULOUSE).

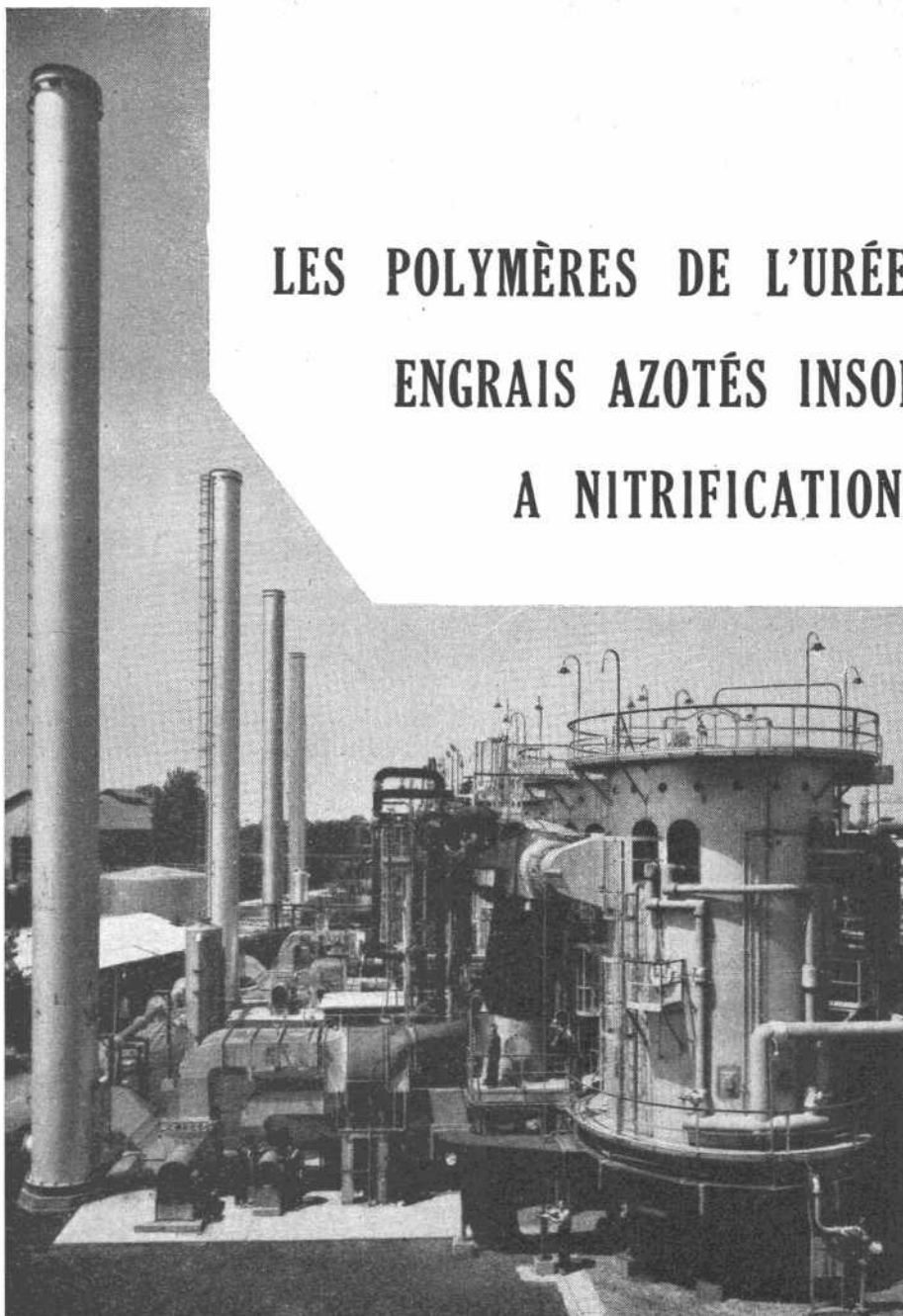


FIG. 1. — La source de l'azote organique de synthèse. Le gaz naturel.  
Vue sur les fours de craking du méthane à l'Office National Industriel de l'Azote, Toulouse.

*L'azote organique de synthèse devient une réalité, et apporte des solutions nouvelles aux problèmes de la fumure azotée. Aussi, nous présentons à nos lecteurs un article particulièrement documenté sur l'urée-formol. Ses auteurs ont suivi l'évolution du produit depuis sa mise au point et ont effectué des études personnelles qui sont rapportées ici. Ces études permettent de mieux comprendre l'intérêt d'un produit que l'Institut Français de Recherches Fruitières Outre-Mer (I.F.A.C.) essaye depuis 1950 et qui a donné sur bananeraie de très importants résultats.*

P. PELEGRIN  
(I. F. A. C.)

## QUELQUES DIFFICULTÉS DANS LA NUTRITION AZOTÉE DES PLANTES

Les plantes s'alimentent en azote en puisant dans le sol celui qu'elles y trouvent à l'état de nitrates ou d'ammoniaque.

Dans la plupart des sols il ne peut subsister que des traces d'ammoniac, les ferments oxydants transformant ce dernier en nitrates au fur et à mesure qu'il peut être formé à partir des matières organiques azotées du sol.

C'est donc finalement de la présence de nitrate dans le sol au moment de la croissance que va dépendre l'abondance de la récolte.

Or cette présence de nitrates est loin d'être garantie en quantité et en situation dans la très grande majorité des cas, sans intervention de l'homme.

La règle générale serait plutôt une disharmonie entre l'azote nitrique disponible à un moment donné et ce que la plante réclamerait pour donner la récolte optimum compte tenu des possibilités génétiques et climatiques.

Les engrais azotés s'efforcent de remédier à cette disharmonie en vue d'obtenir la récolte optimum.

Mais le problème à résoudre est délicat. Il ne suffit pas d'ajouter des nitrates au sol pour que les plantes les absorbent. L'azote nitrique est éminemment libre et il se déplace dans le sol au gré des mouvements de l'eau, tantôt entraîné vers les couches profondes, tantôt remonté dans la croûte superficielle au gré des pluies et de l'évaporation.

D'un autre côté, il est peu indiqué d'apporter une dose massive de nitrates à un moment donné. Si l'intervention a lieu trop tôt, on risque de graves dommages aux racines, ou bien une pluie massive risque de l'entraîner au-dessous du niveau exploité par les racines. Si elle a lieu plus tard, l'insuffisance des pluies peut laisser l'engrais minéral inutile à la surface du sol.

Il est indéniable cependant que l'emploi des engrais minéraux permet de rétablir bien souvent l'harmonie entre la fourniture de façon satisfaisante de nitrates, et les aspirations de la plante. Cette harmonisation par les engrais minéraux se réalise assez aisément sous les climats à pluies peu violentes, bien réparties et nettement supérieures à l'évaporation. Mais quand on s'éloigne de ces conditions idéales, cet ajustement est quelquefois laborieux. Dans certains cas on peut le réaliser grâce à des astuces techniques plus ou moins heureuses, tandis que dans d'autres situations on ne voit pas encore de solution satisfaisante à partir des engrais azotés ordinaires. Quelques exemples extraits

des travaux agronomiques récents illustreront ces difficultés et indiqueront les solutions possibles.

### La fertilisation azotée du blé d'hiver.

Le blé nécessite pour donner de grosses récoltes une fourniture d'azote d'abord faible jusqu'au tallage, puis qui aille s'accroissant pendant la montaison et l'épiaison et qui se poursuive encore pendant le grossissement du grain. Malgré cela, la fertilisation classique ne prévoyait jusqu'à ces dernières années qu'un seul apport d'azote à la fin de l'hiver et dans beaucoup de terres à blé cet apport donnait satisfaction. Mais en Bretagne par exemple on n'avait par cette technique que des récoltes encore insuffisantes. C'est alors que Coïc (1) expérimenta et proposa une méthode de fertilisation comportant des apports complémentaires d'azote pendant la montaison et jusqu'à la floraison du blé. Les résultats dans cette situation de l'Ouest furent extrêmement probants. Les récoltes peuvent y être doublées et atteindre ou surpasser celles des meilleures terres à blé du Nord.

L'extension géographique de cette méthode d'apports tardifs d'azote se heurte toutefois à deux obstacles. Dans les terres profondes et riches du Nord ou de la région parisienne, les résultats ne sont pas aussi marqués que dans l'Ouest. Dans les régions sud de la France ils ne sont pas régulièrement bons et sont, certaines années, décevants.

L'explication peut être trouvée dans les variations de la libération d'azote minéral par les sols et dans les déplacements de ce dernier.

Sous le climat breton, la libération d'azote minéral est lente et ne peut satisfaire les besoins d'une grosse récolte de blé en végétation très active. Par contre, l'azote minéral rajouté en surface, même tardivement, n'a aucune peine à parvenir aux racines sous ce climat régulièrement pluvieux.

Dans la région parisienne et le Nord, il y a toujours un déficit relatif d'azote au début de la végétation du blé. Plus tard, en saison, ce sol riche fournit le plus souvent assez d'azote minéral pour une grosse récolte. En outre, il existe souvent en sol profond et sous climat hivernal assez sec, des réserves d'azote minéral dans le sous-sol que le blé explore.

Dans la région sud en terre profonde et riche, la situation est analogue à celle du Nord. Mais ici par suite du régime très variable des pluies d'automne l'azote minéral peut être abondant ou quasi nul selon

les années. La migration de l'azote nitrique à l'intérieur du sol s'accomplit en effet d'une façon groupée, avec l'allure d'une vague qui descend vers les couches profondes sous la poussée de l'eau infiltrée (2). La vitesse de cette vague est proportionnelle à l'eau infiltrée et se situe autour de 1 cm de déplacement pour 3 à 4 mm de pluie sous le climat d'hiver de la région toulousaine.

Sous l'influence des pluies ordinaires l'azote minéral accumulé à la surface du sol en fin d'été se trouve déplacé vers les couches profondes. Un excès de pluie, même assez modeste, en fin d'hiver précipite alors la quasi-totalité de cet azote dans un espace inaccessible aux racines. On s'explique dès lors comment des variations de pluie hivernale relativement faibles entraînent des variations importantes des rendements du blé. Cette interprétation des faits est confirmée par les observations en cases lysimétriques et par l'étude statistique des relations entre la pluie hivernale et les rendements (3).

Une autre difficulté attend la méthode des applications tardives d'azote minéral dans la région sud :

l'insuffisance des pluies en cours de montaison du blé peut empêcher l'azote minéral de pénétrer jusqu'aux racines. Mais cette dernière difficulté est bien plus nette encore pour le maïs.

#### La fertilisation azotée du maïs en période sèche.

Le maïs répond très bien à la fertilisation azotée sous les climats régulièrement pluvieux tels que ceux de la région paloise ou des Landes en France.

Par contre, les majorations obtenues avec l'azote minéral sont irrégulières et souvent décevantes dans la petite région qui entoure Toulouse (4). En règle générale, le fumier y donne des résultats plus réguliers que les engrais minéraux. Cette anomalie est explicable par les mouvements des nitrates dans le sol. Sous le climat toulousain, nous avons pu montrer qu'une application d'azote faite en surface n'avait que peu ou pas d'action, tandis qu'une distribution d'azote de l'urée sous 20 cm de profondeur donnait des résultats extrêmement nets dans les cas de carence azotée (5). Des mesures en place ont confirmé depuis

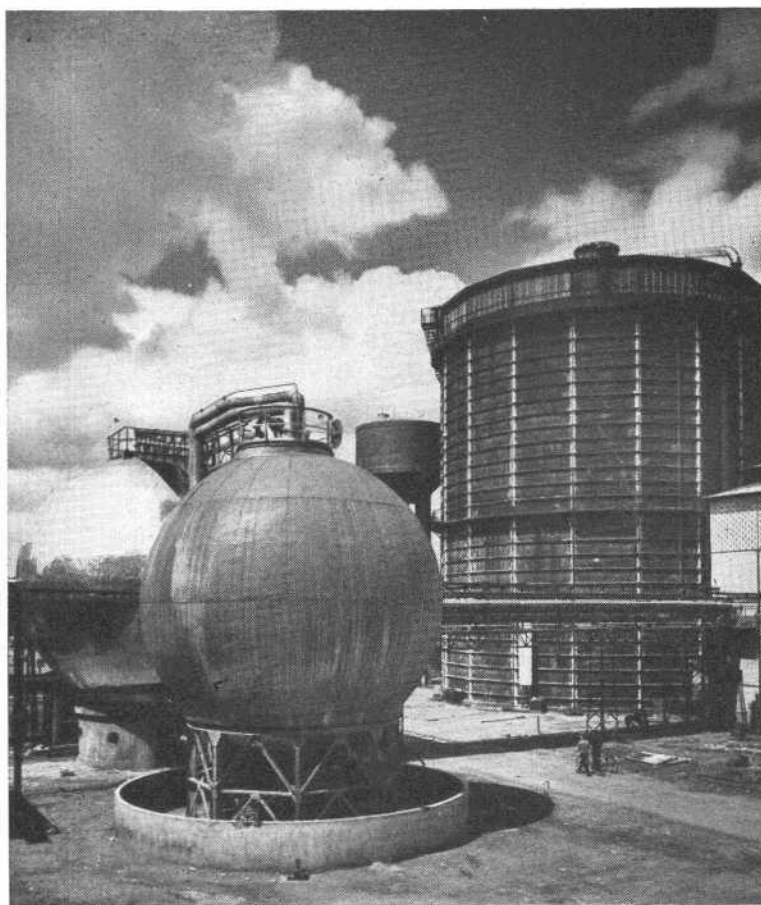


FIG. 2. — Une étape de fabrication de l'azote organique de synthèse. L'ammoniac : Boules de stockage de  $\text{NH}_3$  à l'office National Industriel de l'Azote, Toulouse.

que les nitrates formés au printemps ou rajoutés dans la terre meuble se groupaient dans la croûte superficielle sous l'influence de l'évaporation. L'azote minéral était inactif faute de pouvoir être absorbé à la période des gros besoins du maïs.

#### **La fertilisation azotée des cultures méditerranéennes.**

Cette mobilité de l'azote qui complique quelquefois le problème de la fertilisation sous les climats atlantiques devient encore beaucoup plus gênante sous les climats méditerranéens. Il est remarquable de constater que les engrais organiques qui n'ont pas beaucoup de succès dans le Nord ou l'Ouest de la France et moins encore dans l'Europe du Nord conservent une faveur certaine sur toute la bordure méditerranéenne. Les travaux de DROUINEAU et LEFÈVRE qui se sont attachés à l'étude de la dynamique de l'azote minéral sous ce climat (6-7-8) permettent de comprendre ces différences d'appréciation. Par suite de l'intensité et de la répartition des pluies sous climat méditerranéen les sols de cette région sont riches en azote dans la croûte de surface lorsque par suite de la sécheresse la végétation est impossible et ils sont lessivés en fin d'automne quand la végétation deviendrait possible. Pour la même cause, sous ce climat, les plantes à racines profondes comme la vigne ou les arbres fruitiers vivent de l'azote minéralisé, l'année précédente et que les pluies ont entraîné en profondeur au cours de l'hiver.

L'irrigation apporte, elle aussi, des perturbations importantes dans la distribution de l'azote minéral qu'elle peut déplacer verticalement trop bas pour les racines ou en même temps latéralement et vers la surface du sommet du billon dans le cas d'irrigation à la raie. Elle contribue aussi à accélérer la décomposition de l'azote organique du sol et l'appauvrit assez rapidement. Dans une telle situation, on conçoit que les engrais azotés insolubles nitrifiant lentement se comparent avantageusement quelquefois aux engrais minéraux. Ce n'est pas directement une question d'humus mais une question d'emplacement de l'azote : le moins mobile est celui qui a chance de se trouver à portée des racines lorsque la végétation est possible.

Un autre problème se pose dans cette région malgré qu'il ne lui soit pas particulier.

Les horticulteurs, fleuristes et maraîchers emploient de grosses doses d'engrais. Si l'arrosage n'est pas très abondant et le sol perméable, cela peut conduire à des concentrations salines excessives qui sont préjudiciables aux racines. Les dommages causés par ces

imprudences sont quelquefois importants, étant donné la valeur élevée des plantes cultivées ici.

#### **La fertilisation azotée des plantes tropicales.**

Les difficultés du climat méditerranéen sont multipliées sous les climats tropicaux. Pluies et sécheresses y alternent et se manifestent avec une intensité beaucoup plus grande. Circonstance aggravante, les sols sont pauvres en azote et le plus souvent composés d'éléments grossiers, très perméables.

Une indication intéressante est fournie par la végétation située auprès des villages. C'est là où les déchets organiques sont rejetés que les caféiers ou les bananiers ont l'aspect le plus vigoureux. Une libération continue d'azote minéral doit nécessairement conduire ici à une nutrition plus certaine de la végétation sous un climat aussi heurté où les nitrates se déplacent certainement très vite.

Il reste à vrai dire beaucoup de recherches à faire avant que nous puissions adopter sous ce climat des solutions aussi satisfaisantes que celles admises sous climat tempéré. C'est une des grandes questions posées à l'agronomie. Elle commande le développement de l'agriculture tropicale.

#### **Fertilisation azotée de l'herbe.**

L'herbe des prairies a pratiquement une poussée continue pendant la belle saison quand l'humidité est assez bien répartie et l'azote suffisant.

La difficulté se trouve ici dans la fourniture d'azote minéral à la même vitesse que la pousse de l'herbe. Si l'on apporte une dose modérée d'azote nitrique, la première coupe épuise toute la fourniture et la deuxième manque d'azote. Donner une dose plus importante de nitrate à l'origine n'est pas indiqué, car l'herbe se gorgerait d'azote sans que pour autant les coupes postérieures à la première profitent beaucoup de ce supplément. Un palliatif est la fourniture simultanée d'azote sous deux formes dont l'une moins mobile que l'autre. Mais cela n'évite pas que la seule solution possible à partir de l'azote minéral soit la fourniture de doses modérées successives dont l'application est faite après chaque coupe au profit de la coupe suivante. Cette technique est très employée et donne satisfaction quand la pluie ou un arrosage suivent au plus près l'application d'engrais azoté. Mais elle est astreignante et l'on peut rêver mieux. Elle est mise en échec lorsque la croissance restant possible par l'eau emmagasinée dans le sol, l'absence de pluie ne permet pas de véhiculer l'azote jusqu'aux racines. Les légumineuses comme la luzerne manifestent alors la supé-



riorité que leur donne une nutrition azotée autonome. L'idéal serait de donner aux graminées un mode de nutrition azotée équivalent.

#### Peut-on trouver une solution meilleure aux problèmes de la fumure azotée ?

L'idéal serait évidemment de placer dans le sol au niveau des racines un composé azoté qui serait insoluble pour ne pas être entraîné vers le bas ou vers le haut, mais se laisserait décomposer progressivement pour fournir de l'azote minéral soluble au fur et à mesure et au même rythme que la plante croît. Cette décomposition devrait être suffisamment rapide pour ne pas étaler sur plus de deux ou trois ans la récupération quasi totale du capital engagé dans la fertilisation.

Sous cette forme de perfection dans les désirs, cet engrais idéal a bien des chances de rester longtemps encore un idéal inaccessible. Mais des solutions approchées sont déjà possibles. L'une d'elles est l'urée méthylée ou urée-formaldéhyde ou urée-formol déjà proposée dans divers pays, sous des noms divers.

Chacun de ces noms correspond d'ailleurs à des procédés de fabrication différents et à des caractéristiques plus ou moins voisines.

**Urée-formol** est en effet le nom générique de toute une vaste famille de produits ayant même origine chimique, mais qui, du point de vue fertilisant, peuvent se comporter de façon différente.

**Azorgan** est celui que l'Office National Industriel de l'Azote a choisi pour désigner les produits fabriqués dans son usine de Toulouse par des procédés originaux.

Ces produits sont insolubles dans l'eau ou bien ne sont solubles qu'à un taux très faible ou pour une faible partie de leur masse. Ils peuvent donc résister au lessivage comme aux remontées et aux déplacements latéraux avec l'eau de pluie ou d'irrigation.

Mais au contact du sol ils subissent une hydrolyse qui libère progressivement de l'ammoniac. Le rythme de cette libération peut être réglé d'après la composition ou le procédé de fabrication du produit ; il est également soumis à la nature du sol et aux conditions écologiques.

Dire que ces produits fourniront de l'azote à la mesure exacte des aspirations de la plante serait aller trop loin pour le moment. Ils sont plutôt en mesure de libérer de l'azote d'une manière continue selon une courbe prédéterminée, à la manière dont agissent déjà certains composés organiques. En ce sens aussi bien par leur origine que par les caractéristiques de leur comportement dans le sol, on peut dire qu'ils sont véritablement de l'azote organique de synthèse.

En attendant l'engrais azoté idéal qui fournira l'azote à la demande de la plante, ils sont capables de résoudre mieux qu'on ne pouvait le faire jusqu'ici les divers problèmes de fertilisation que nous avons évoqués au début de cet exposé.

Il est en outre certain que nous ne sommes qu'au début d'une nouvelle conception de la fertilisation azotée et que les progrès conjugués de nos connaissances en physiologie végétale, en biologie du sol et en chimie des polymères de l'urée, nous permettront dans un délai indéterminé des adaptations plus parfaites.

## FABRICATION DE L'AZORGAN

L'Azorgan U. F. est obtenu par réaction catalysée entre l'urée et la formaldéhyde. Ce type de fabrication n'est pas nouveau dans son principe, puisque déjà en 1924, un procédé est signalé en Allemagne. Depuis, dans le but d'obtenir de l'azote synthétique lentement disponible dans le sol, de nombreux autres procédés ont été étudiés et mis au point tant en Allemagne qu'aux États-Unis et en France. Ces procédés ont généralement fait l'objet de brevets.

L'O. N. I. A., pour sa part, s'est préoccupé de cette fabrication depuis 1946.

Le graphique n° 1 donne le schéma complet de la fabrication de l'azote organique de synthèse de l'Azorgan, telle qu'elle est conduite à l'O. N. I. A.

Le départ de la fabrication met en jeu du gaz naturel, de la vapeur d'eau et de l'air.

Le cracking catalytique du gaz naturel, à haute température, en présence de vapeur d'eau, produit de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone. Une injection d'air dans un four de post-combustion permet d'apporter l'azote nécessaire. Une nouvelle addition de vapeur d'eau en présence d'un autre catalyseur transforme l'oxyde de carbone en gaz carbonique qui est éliminé et conduit vers l'atelier d'urée.

La synthèse de l'ammoniac est alors effectuée soit par le procédé Haber, soit par le procédé Casale après compression et purification des gaz.

A partir de cet ammoniac et du gaz carbonique retiré

plus haut du gaz de synthèse et après purification de ces deux gaz, la synthèse de l'urée est opérée sous une pression voisine de 150 kg et aux environs de 175° C. On arrive ainsi à la fin de la première chaîne de fabrication.

La seconde chaîne part du mélange hydrogène, oxyde de carbone, après cracking du gaz naturel, et conduit d'abord à la synthèse catalytique du méthanol vers 400°, sous 200 kg de pression environ. Par oxydation ménagée du méthanol par l'air en présence d'un catalyseur, on obtient le formol. Cette opération est effectuée à 400° C à la pression atmosphérique.

A ce stade commence vraiment la fabrication de l'Azorgan.

La réaction entre l'urée et la formaldéhyde, conduit d'abord aux méthylols-urée, aux méthylènes-urée et enfin par condensation et polymérisation catalytique aux polyméthylènes-urée qui constituent l'Azorgan.

### Caractéristiques de l'Azorgan.

L'Azorgan n'est pas une espèce chimique, mais un mélange en proportions définies de produits du type

polyméthylène-urée, plus ou moins polymérisés, donc plus ou moins solubles.

L'Azorgan contient 39 % d'azote engagé dans

1° Des produits solubles dans l'eau à la température ordinaire. Ce sont des monomères tels que les méthylols-urée, ou des produits peu polymérisés. Leur proportion varie suivant les types d'Azorgan.

2° Des produits insolubles à la température ordinaire mais solubles dans l'eau à 100° C, constitués par des polymères moyens, cette fraction pouvant représenter de 10 à 40 % de l'azote total suivant le type désiré.

3° Des produits insolubles à 100° C, très polymérisés, pouvant représenter 20 à 80 % de l'azote total selon les types.

Cette série de corps organiques de complexité croissante constituant l'Azorgan, explique l'échelonnement dans le temps de la libération de l'azote et l'on conçoit que, en faisant varier les proportions relatives des produits solubles, peu solubles et insolubles, on puisse arriver à des composés de propriétés très différentes.

En faisant varier les différents facteurs qui influent sur la polymérisation des composés urée-formaldéhyde on peut arriver à une grande variété de produits.

Ces facteurs sont :

— la fabrication en solutions diluées ou en solutions concentrées,

— le rapport molaire U/F,

— les conditions et agents de la polymérisation catalytique,

— le pH, la température, la durée du temps de réaction, la pré- ou post-polymérisation, la réfrigération, le séchage.

Les produits ainsi obtenus présentent effectivement des propriétés différentes et la vitesse de libération de leur azote dans le sol est variable, ainsi que le montreront plus loin les courbes de nitrification. Les divers types pourront donc répondre à des conditions d'utilisation différentes.

### Chimie des urée-formaldéhydes.

Ainsi que nous venons de le voir, le nombre de facteurs pouvant influencer sur la réaction de l'urée et de la formaldéhyde est important et cette réaction présente une grande complexité.

On connaît depuis un certain temps l'utilisation des résines d'urée-formaldéhyde dans l'industrie des textiles et des matières plastiques. Si l'on possède des renseignements théoriques et techniques sur ces produits, on manque par contre de précisions sur la structure exacte des composés d'urée-formaldéhyde utilisables comme engrais.

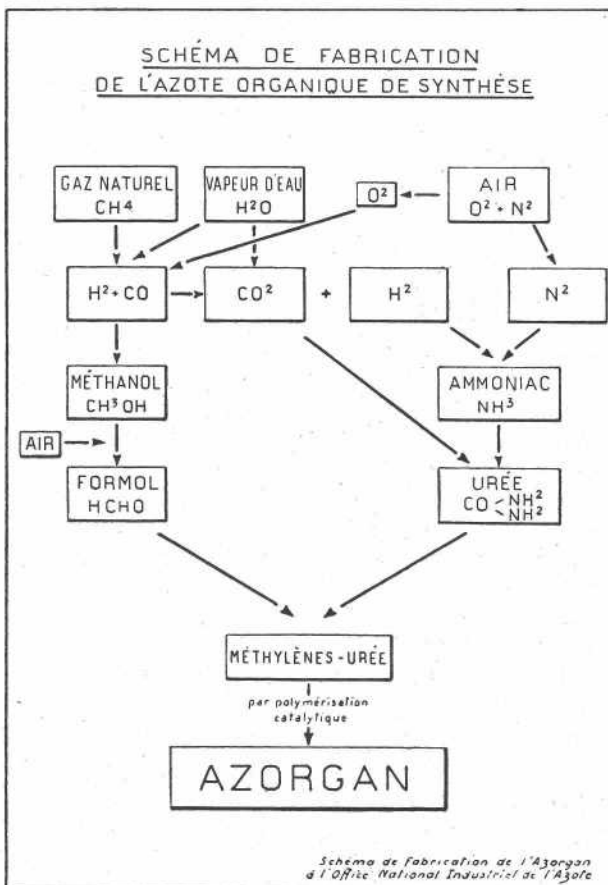
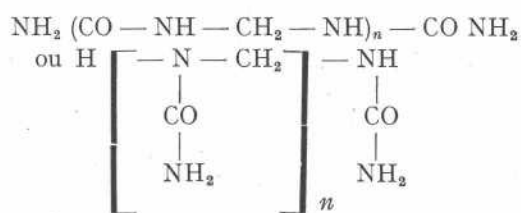




Fig. 3. — Une étape de fabrication de l'Azote organique de synthèse. Synthèse de l'Urée à l'Office National Industriel de l'Azote. Toulouse.

En 1948, CLARK, YEE et LOVE (9) étudient les conditions de réaction entre l'urée et la formaldéhyde ; ils essaient de définir les différences de constitution des résines suivant que le rapport molaire U/F est inférieur à 1, cas des matières plastiques, ou supérieur à 1, cas des résines à usage d'engrais.

En partant du méthylène-diurée, ils indiquent comme formule du polymère :



Ils excluent pour l'urée-formaldéhyde les structures complexes à noyaux, à liaisons transversales et limitent les structures aux chaînes droites ou à leurs combinaisons.

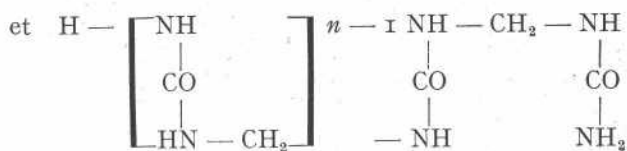
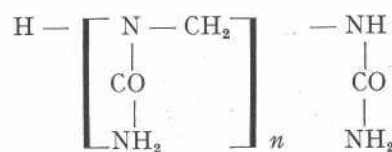
CLARK et YEE en 1951 (10) indiquent comme processus des réactions, la formation de méthylol-urée, puis de méthylène-diurée, puis de polyméthylènes-urée, ces divers composés pouvant réagir entre eux.

Selon ces mêmes auteurs (11), pour que l'urée et la formaldéhyde réagissent en donnant des produits avec un rapport U/F > 1, il est nécessaire qu'au moins quelques résidus d'urée soient présents sous forme de polymères du type méthylène à chaîne ramifiée ou droite.

Dans ce cas :

$2 \geq U/F = \frac{n+1}{n} \geq 1$  pour  $n = 1$  U/F = 2 et le produit est une méthylène-diurée stable.

Ces auteurs indiquent comme formules :







## Recherches agronomiques

TABLEAU I.

ESSAIS DE NITRIFICATION COMPARÉE DE DIVERS POLYMÉTHYLÈNE-URÉE ET DE PRODUITS ORGANIQUES NATURELS.

En étuve à 28°.

1° Terre de Limon. Vallée de la Garonne.

200 mg azote par kilogramme de terre

pH du sol avant addition de CO<sub>3</sub>Ca : 6,51 500 mg CO<sub>3</sub>Ca par kilogramme de terre

PRODUITS A L'ESSAI	AZOTE % DANS LE PRODUIT	AZOTE NITRIFIÉ % DE L'AZOTE INTRODUIT								
		NOMBRE DE JOURS								
		7	14	21	35	49	63	77	98	126
Sulfate d'ammoniaque. . . . .	21.07	39	70	81	86	88	89	87	88	88
Polyméthylène-urée :										
type A . . . . .	38.69	27	35	43	55	62	69	75	77	79
— B . . . . .	34.86	21	34	41	45	52	56	57	59	68
— C . . . . .	38.36	11	20	28	40	47	50	53	59	69
— D . . . . .	39.40	14	21	29	36	41	42	43	44	47
— F . . . . .	36.70	3	5	10	15	20	24	26	29	33
Tourteau d'arachide. . . . .	8.23	43	55	60	62	65	68	69	70	73
Tourteau de carthame. . . . .	4.27	26	38	47	49	50	50	49	50	52
Corne moulue . . . . .	14.50	5	15	24	45	54	68	72	72	70
Farine de luzerne. . . . .	2.49	3	9	12	19	25	30	33	38	40
Fumier pulvérisé. . . . .	1.09	2	2	2	3	3	4	6	10	14

TABLEAU II.

2° Terre de Guinée-Kindia.

200 mg azote par kilogramme de terre

Très acide pH : 5,0

Pas d'addition de CO<sub>3</sub>Ca

PRODUITS A L'ESSAI	AZOTE % DANS LE PRODUIT	AZOTE MINÉRALISÉ % DE L'AZOTE INTRODUIT											
		NOMBRE DE JOURS											
		7	14	21	28	42	47	71	85	105	126	154	280
Sulfate d'ammoniaque. . . . .	21.07	91 *	91	96	97	98	99	99	99	98	98	100	100
Polyméthylène-urée :													
type D . . . . .	39.40	19	28	37	39	48	55	56	62	64	66	69	80
— E . . . . .	32.58	4	10	16	18	24	28	33	42	47	50	57	74
— F . . . . .	36.70	6	8	11	14	17	23	25	27	32	38	41	52
Corne moulue . . . . .	14.50	5	10	17	20	20	21	23	30	43	57	58	63
		0	0	2	5	18	21	23	30	43	57	58	63

(\*) 1<sup>re</sup> ligne : N minéral, ammoniacal + Nitrique. — 2<sup>e</sup> ligne : N nitrique.

terre est chaulée pour amener son  $pH$  à l'optimum du point de vue de la nitrification, sauf dans le cas où l'on étudie un sol de type particulier.

Le tout est introduit dans des flacons constituant autant de séries parallèles qu'il y a de produits à essayer, plus une série témoin sans azote afin de mesurer la part de l'azote minéral revenant à la nitrification naturelle du sol.

On ajoute de l'eau pour amener le sol à une humidité optimum et les flacons sont mis à l'étuve à 28° C.

Le taux d'humidité est rétabli à intervalles réguliers une ou deux fois par semaine.

A des intervalles de 7 jours au début de l'expérience, puis de 14, 21 ou 28 jours au fur et à mesure que l'essai se poursuit, on retire 1 ou 2 flacons de chaque série.

La terre est épuisée par une solution normale de chlorure de calcium et l'on dose l'azote ammoniacal et nitrique présent. Déduction faite de l'azote minéral présent dans le témoin, on peut juger de l'azote minéral libéré par le produit à l'essai.

### Résultats expérimentaux.

Nous donnons ci-après les résultats de deux essais de nitrification particulièrement caractéristiques :

Le premier essai est effectué avec une bonne terre de la vallée de la Garonne et chaulée.

On y compare la nitrification d'une série de composés urée-formaldéhyde, avec divers produits organiques naturels bien connus ; tourteaux d'arachide et de carthame, corne moulue, farine de luzerne, fumier desséché et pulvérisé.

L'essai a duré 126 jours : les résultats sont consignés au tableau I et traduits sur les courbes du graphique II.

Le second essai porte sur une terre tropicale en provenance de Kindia (Guinée) ; cette terre ne fut pas chaulée.

On compara divers types d'urée-formaldéhyde avec la corne moulue et le sulfate d'ammoniaque. L'essai a duré 280 jours. Les résultats sont donnés au tableau 2 et traduits graphiquement au-dessous des précédents.

### Comparaison entre les divers polymères.

On constate que certains produits faiblement polymérisés nitrifient sur un rythme très régulier pour atteindre 62 % en 50 jours et 80 % en 126 jours.

D'autres arrivent à 50 % en 50 jours et 68 % en 126 jours. D'autres enfin plus fortement polymérisés n'atteignent que 20 % en 10 jours et 33 % en 126 jours.

Ces courbes présentent de plus des allures différentes,

surtout dans les premiers temps, selon la proportion relative des diverses fractions présentes dans le produit.

Le produit B démarre relativement vite, tandis que le produit C est remarquable par sa progressivité.

Il est donc confirmé qu'on peut obtenir une gamme de produits à vitesse de nitrification contrôlée.

### Comparaison des polymères avec des produits organiques naturels.

Les séries parallèles des divers produits organiques naturels présentent, elles aussi, des différences très sensibles entre leurs vitesses de nitrification et entre leurs taux maxima d'azote nitrifiable pendant la durée de l'épreuve.

Le tourteau d'arachide arrive après un départ assez rapide à 73 % d'azote nitrifiée en 126 jours.

La corne moulue atteint 54 % en 50 jours et 70 % en 126 jours par une pente beaucoup plus progressive.

La farine de luzerne arrive à 25 % en 30 jours et à un maximum de 40 % en 126 jours.

Le fumier pulvérisé n'atteint que 14 % en 126 jours.

On constate avec intérêt qu'une gamme de polymères synthétiques de vitesse et de taux de nitrification variables correspond presque exactement à une gamme parallèle de produits organiques naturels déjà employés et appréciés comme engrais.

### Comparaison entre les terres essayées.

L'examen des courbes montre que lorsqu'on change de type de sol, la vitesse et le taux de nitrification sont susceptibles de se modifier sensiblement.

Dans le cas présent ils sont plus élevés dans la terre de Guinée que dans le sol de la vallée de la Garonne.

D'autres essais sont en cours sur des types de sols différents et il sera certainement intéressant et profitable d'essayer divers composés d'urée-formaldéhyde sur toute une gamme de sols.

#### b) Essais de tests de solubilité.

Le test de nitrification dans le sol permet un bon jugement de la valeur des composés urée-formaldéhyde et de les comparer entre eux, mais il est long et laborieux. Il faut de 6 à 12 semaines et quelquefois plus pour avoir un résultat valable.

C'est pourquoi de nombreux chercheurs ont tenté de mettre au point des tests chimiques de solubilité



PHOTO 4. — *En haut* : Un beau régime de bananier nain dans les parcelles des essais urée-formol à la Station Centrale de l'I. F. A. C. en Guinée.

PHOTO 5. — *En bas* : Rejets vigoureux de bananier nain dans les parcelles des essais urée-formol à la Station Centrale de l'I. F. A. C. en Guinée.

(Photos A. Comelli I. F. A. C.)

et de les étalonner pour les substituer à la nitrification.

Parmi ces tests de solubilité on peut citer :

— Les méthodes au permanganate neutre et au permanganate alcalin définies par l'A. O. A. C. en 1950, destinées à juger l'activité de l'azote insoluble dans l'eau froide.

— La solubilité dans l'eau à 30° C primaire et secondaire, A et Bx : (10) définies par CLARK, YEE et LOVE en 1951. Cette méthode a quelquefois été compliquée de solubilité de 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup> degré par certains auteurs.

— La méthode de l'indice d'activité de KRALOVEC et MORGAN (13), récemment adoptée par l'A. O. A. C. et qui comprend :

— la mesure de l'azote insoluble dans l'eau froide à 25° C,

— la mesure de l'azote insoluble à chaud à 100° C dans une solution tampon de phosphate de potasse,

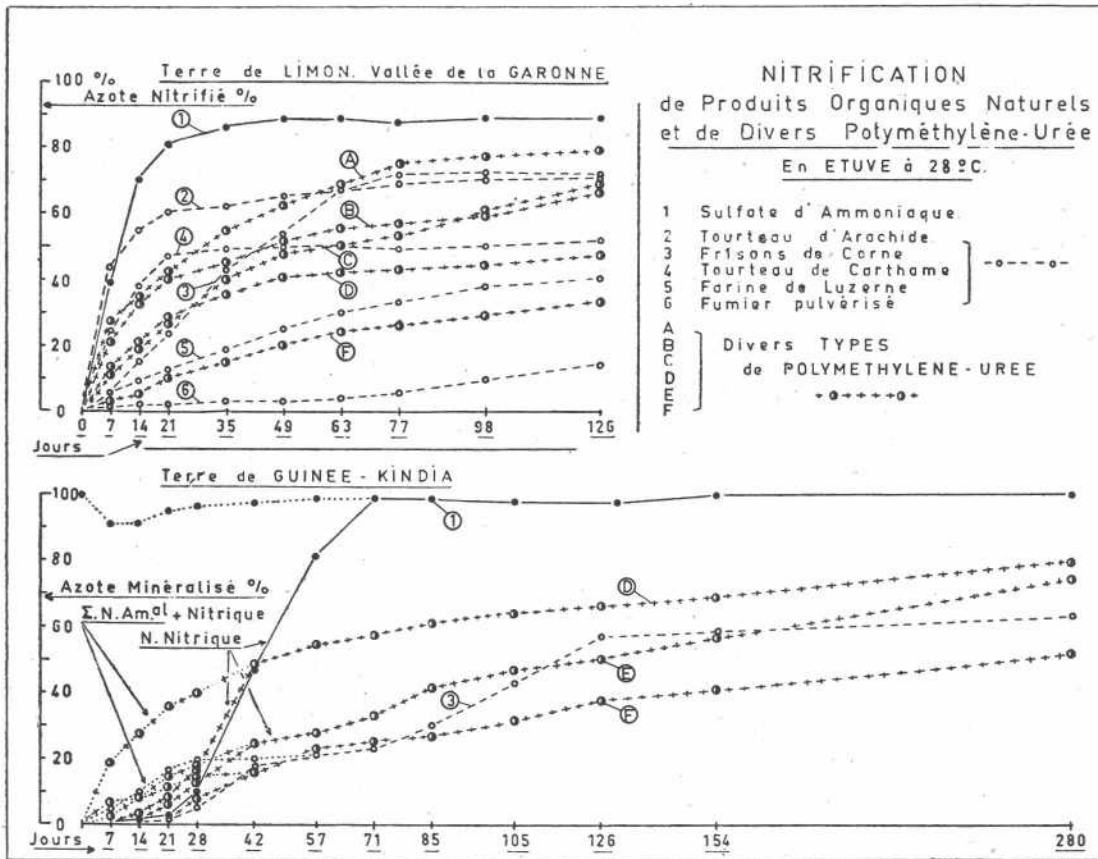
— le calcul de l'indice d'activité qui est le pourcentage de l'azote insoluble à froid qui devient soluble à chaud.

— CLARK, YEE et GADY en 1956 (11) ont étudié les relations entre les divers tests de solubilité et la nitrification dans le sol.

Selon ces auteurs la méthode au permanganate ne permet pas d'évaluer correctement la valeur de l'N insoluble dans l'eau.

L'azote soluble dans l'eau à 25° C tendrait à représenter l'azote nitrifiable en 2 à 3 semaines et la partie supplémentaire qui se solubilise à chaud, l'azote nitrifiable entre 3 et 15 semaines.

Notre opinion est que les choses ne sont pas aussi bien définies surtout quand on passe d'un type de sol à un autre.



Des produits ayant réagi de manière différente aux tests physiques ci-dessus définis peuvent donner des courbes de nitrification presque superposables.

Les tests de solubilité ne permettent, à notre avis, qu'un jugement incertain sur la valeur d'un composé urée-formaldéhyde et l'essai de nitrification ou l'expérience *in situ* sur les plantes constituent encore, quelles qu'en soient la complexité et la durée, la source la plus sûre de renseignements.

**Les essais pratiques.**

Les comptes rendus des auteurs américains citent de nombreux essais d'application des composés urée-formaldéhyde dans la fertilisation azotée des plantes.

La contribution principale à nos connaissances des produits urée-formaldéhyde utilisés comme engrais azotés est celle du Bureau of Plant Industry à Beltsville (Maryland).

Parmi ces travaux on peut citer :

- ceux de YEE et LOVE en 1946 (14),
- ceux de CLARK, YEE et LOVE (en 1948) (9) avec expériences en serre et en plein champ,
- les études microbiologiques de FULLER et CLARK en 1947 (15),
- les essais sur gazon de ARMIGER, FORBES, WAGNER et LUNDSTROM en 1948 (16),
- ceux de ARMIGER, CLARK, LUNDSTROM et BLAIN, également sur gazon en 1951 (17). Ces deux essais ont été effectués en pots,
- les études de CLARK, YEE, LOVE et BOYD en 1951 qui font état d'essais sur gazon et sur tabac (10).

On peut citer par ailleurs des essais de MUSSER à la Station agronomique de l'Université de Pensylvanie, toujours sur gazon (18) et également des essais sur maïs.

Ces expériences font état de résultats favorables. Les composés urée-formaldéhyde ont provoqué un développement plus régulier et plus soutenu des plantes que les engrais azotés classiques et ont stimulé davantage la croissance des racines et rhizomes.



On peut appliquer sans danger pour les plantes de fortes doses d'urée-formaldéhyde au début de la végétation et assurer ainsi, sans nouvel apport, l'alimentation régulière des plantes à croissance longue ; les engrais azotés minéraux solubles ont à dose égale, soit tué les jeunes plantes, soit fortement entravé le système racinaire.

**Essais réalisés à la station Centrale de l'I. F. A. C.**

L'Azorgan fabriqué par l'O. N. I. A. a été notamment utilisé dans un essai sur Bananiers exécuté par la station de l'I. F. A. C. à Kindia en Guinée ; fabriqué en 1948 ce produit était une première version à nitrification très lente (type F du graphique II).



PHOTO 6. — Parcelle de bananiers nains avec urée-formol à la Station Centrale de l'I. F. A. C. en Guinée. Remarquer la vigueur des bananiers qui forment un effet de voûte élevée très marqué. Au centre : MM. Champion et Monnet qui dirigent l'étude des essais sur bananiers. (Photo A. Comelli I. F. A. C.)

Nous reproduisons ci-après des extraits du compte rendu résumé déjà publié dans cette revue (19) :

« On a comparé, avec toutes les précautions agronomiques et statistiques requises,

— le sulfate d'ammoniaque en 4 épandages annuels,

— le sulfate d'ammoniaque en 2 épandages annuels,

— un engrais complexe 20.20 renfermant :

20 % d'azote { 9,5 nitrique du nitrate d'ammoniaque  
10,5 ammoniacal des nitrate et phosphate d'ammoniaque

20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> { 6 soluble à l'eau et  
14 soluble au citrate d'ammonium »

— l'urée-formol en deux fois par an.

« L'essai qui a duré près de cinq ans est analysé ci-dessous globalement entre la plantation (juillet 1950) et fin 1954.

« Pendant cette période de 4 ans et 5 mois, 2 800 kg d'urée-formol ont été apportés à l'hectare, soit environ 600 kg par an, ce qui correspond à 240 kg d'azote à l'hectare. La même quantité d'azote était

épanchée sur les parcelles de sulfate d'ammoniaque (5 600 kg).

« Le surplus de rendement a été de 28,8 tonnes-hectare pendant ces 4 ans et 5 mois pour les parcelles d'urée-formol.

« Les tonnages cumulés à l'hectare des parcelles sont les suivantes :

urée-formol . . . . . 178,45 t/ha (4 ans et 5 mois)  
sulfate d'ammoniaque. 149,65 t/ha (4 ans et 5 mois)

« Comme renseignements complémentaires on peut noter pendant la même période :

	NOMBRE DE RÉGIMES	NOMBRE DE RÉGIMES PAR PIED en 4 ans et 5 mois	POIDS MOYEN PAR PIED
Urée-formol . . .	307	4,80	22,34
Sulfate d'ammoniaque en 4 fois . .	291	4,55	19,32

« Nous noterons que l'aspect des parcelles urée-formol témoigne de leur supériorité (couleur de feuillage, hauteur des plants).

« De plus, par manque d'engrais on n'a pu épandre en 1954 les quantités d'urée-formol prévues au protocole.

« Toute application d'urée-formol a cessé en octobre 1954 alors que l'on a appliqué encore la 4<sup>e</sup> dose du sulfate d'ammoniaque en février 1954. Or, l'accroissement de rendement que procure chaque année l'urée-formol se maintient malgré tout égal à 20 % environ. »

« L'arrière-action du produit se confirme donc (1). »

### Le point de vue économique.

A quel prix ces nouveaux produits pourront-ils être livrés à l'agriculteur ?

Il ne faut pas cacher que ce prix sera certainement supérieur à celui des engrais minéraux.

En effet la source primitive d'azote est l'urée dont le prix à l'unité est égal à celui des autres engrais azotés minéraux. A cette urée on rajoute du formol dont le prix est équivalent à celui de l'urée employée. Il faut décompter enfin les frais d'une fabrication qui n'est pas simple et qui nécessite de l'outillage, de l'énergie et un contrôle sévère. Ces raisons font qu'il ne faut guère espérer descendre au-dessous de trois fois le prix de l'azote minéral. Malgré cela il est certain que le produit garde un intérêt économique pour beaucoup de cultures ou de situations.

D'une part ce prix est inférieur à celui de l'azote organique naturel qui pourtant conserve une faveur persistante malgré ses prix élevés. D'un autre côté le résultat cultural est le vrai critérium de l'intérêt d'un engrais. Quelques milliers de francs supplémentaires à l'hectare peuvent être largement récupérés si la récolte est meilleure ou plus régulière.

Il ne faut pas, non plus, perdre de vue que ce qui compte en définitive n'est pas l'azote mis dans ou sur le sol, mais bien celui que les plantes absorbent en réalité. Il est des situations où l'Azorgan fournira plus « d'azote-racines » que tout autre forme.

Dans le cas de l'essai sur Bananier en Guinée voici comment les agronomes de l'I. F. A. C. envisagent cette question.

(1) A la suite de cet essai et pour remédier à la lenteur d'action de l'urée-formol qui ne donnait des résultats positifs qu'à partir de la 2<sup>e</sup> année, la fabrication a été modifiée.

Le produit fabriqué actuellement pour la culture bananière est plus aisément attaquable dans le sol et libère son azote plus rapidement.

« Le surplus de rendement que donne l'emploi de l'urée-formol par rapport au sulfate d'ammoniaque épandu en 4 fois se chiffre au moins à 30 tonnes par hectare au bout de 5 ans de culture, soit 6 tonnes de plus par hectare et par an. »

Le prix du sulfate d'ammoniaque, magasin Conakry, se chiffre à 18,2 fr. C. F. A., le kilogramme. Si l'on admet que l'azote dans l'urée-formol coûtera 3 fois plus que l'azote minéral du sulfate d'ammoniaque, le prix de l'Azorgan rendu plantation sera environ de 100 fr. C. F. A. le kilogramme.

Les deux fumures en comparaison ont coûté :

sulfate d'ammoniaque...  $5.600 \times 18,2 = 101.920$   
urée-formol...  $2.800 \times 100 = 280.000$

soit un supplément de 180.000 fr. C. F. A. de dépenses du côté de l'urée-formol, pour un surplus de récolte de 30 tonnes.

« Le prix de revient du kilogramme supplémentaire de bananes dû à l'urée-formol ressort donc à 6 francs C. F. A. »

Malgré son prix élevé l'urée-formol est ici nettement plus avantageux que le sulfate d'ammoniaque. On peut espérer que les nouvelles fabrications amélioreront encore cet avantage.

### Les conditions d'utilisation.

La description que nous venons de faire des caractéristiques agronomiques et économiques des composés d'urée méthylée du type Azorgan nous permettent de prévoir les situations où ces produits présenteront le plus d'intérêt.

Cet intérêt sera certainement très grand sous climat tropical pour la fertilisation des plantations fruitières des caféiers, théiers et cacaoyers. Les résultats déjà obtenus par l'I. F. A. C. sont très significatifs à cet égard. On rencontre ici toutes les circonstances favorables : avantage technique de la solubilisation progressive, absence d'hygroscopicité qui permet la bonne conservation, grande concentration qui économise les frais de transports.

Il est possible, malgré un rapport des prix moins favorables que des cultures telles que le coton ou l'arachide révèlent aussi un intérêt réel pour ce produit spécialement en terres épuisées pauvres en matière organique.

En cultures irriguées même sous climat métropolitain l'intérêt sera également très important, les risques de lessivage étant réduits ou annulés.

Les maraîchers ou fleuristes apprécieront son absence de toxicité racinaire aux doses élevées.

Les amateurs de gazon vert trouveront dans ce produit l'engrais idéal qui n'a pas besoin d'être renouvelé à chaque coupe. De même les amateurs de fleurs ne risqueront pas le brûlage de leurs plantes par une application intempestive d'engrais minéral.

Pour les arbres fruitiers en culture intensive, il semble que le produit doit retenir l'intérêt, surtout dans le cas d'irrigation. Une libération continue d'azote permet une bien meilleure répartition dans toute la couche du sol accessible aux racines. Les cultures fruitières doivent en bénéficier grandement, spécialement si elles sont anciennement installées sur des sols graveleux qui vont s'épuisant en azote organique. La situation sera la même pour la vigne si les conditions économiques permettent d'utiliser ce produit, plus coûteux que les engrais ordinaires sans l'être davantage cependant que bien des produits organiques déjà employés.

Pour les cultures plus ordinaires telles que céréales, prairies, pommes de terre, betteraves sous climat métropolitain, il est douteux que l'Azorgan à lui seul donne des résultats supérieurs à ceux que l'on peut attendre des engrais minéraux bien maniés. Mais il pourrait constituer un complément à ces engrais en fournissant à tout moment dans le sol l'azote qui n'est actuellement fourni que par saccades. Enfoui profondément, il entretiendrait dans le sous-sol une source d'azote minéral capable d'y attirer les racines. Il serait un régulateur de la nutrition azotée particulièrement précieux dans les années sèches ou trop humides. Mais ici nous sommes plus dans le domaine des hypothèses que dans celui des certitudes actuelles. Des recherches soigneuses sont à faire avant que l'on puisse se prononcer.

Mais il ne faut pas oublier non plus que nous ne sommes qu'au début de ces nouvelles fabrications et qu'un perfectionnement est certainement possible pour harmoniser la fourniture d'azote à la cadence de la végétation.

Ce qui est actuellement acquis, c'est la possibilité de s'évader des conditions classiques de la fertilisation azotée. Cette possibilité donnée aux agronomes leur permettra de mettre au point des solutions nouvelles là où l'arsenal jusqu'à présent disponible ne permettait que des solutions imparfaites aux problèmes de la fumure azotée.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) COIC (Y.). — Action des engrais azotés répandus à la floraison sur l'Activité assimilatrice des organes chlorophylliens du Blé d'Hiver. *C. R. Ac. Agr.*, 1949, p. 175.  
— L'apport à dose normale et à une époque favorable d'engrais azotés immédiatement assimilables peut provoquer ultérieurement un besoin supplémentaire d'azote. *C. R. Agr.*, 1949, p. 79.
- (2) SOUBIS (L.), GADET (R.) et MAURY (P.). — Migration hivernale de l'Azote nitrique dans un sol limoneux de la région toulousaine. *A. A.*, 1952-3, p. 365-383.
- (3) SOUBIS (R.), GADET (R.). — Travaux inédits de la station de Recherches Agronomiques de l'O. N. I. A.
- (4) MALTERRE (H.). — Fumure des maïs en Aquitaine. *B. T. I.*, n° 81, 1953 et *Bulletin d'Agriculture du Sud-Ouest*, n° 351, II, 1955.
- (5) SOUBIS (L.), GADET (R.), LENAIN (M.). — Une difficulté particulière à la fertilisation azotée du maïs et le moyen d'y remédier. *C. R. A. A.*, 1956, p. 247-250.
- (6) LEFÈVRE et DROUINEAU. — Variations saisonnières de la teneur en azote minéral dans un sol calcaire soumis au climat méditerranéen. *An. Ag.*, 21, 1951, p. 1-12.
- (7) DROUINEAU, LEFÈVRE et M<sup>me</sup> BLANC-AICARD. — Observations sur la localisation de l'azote minéral en été sous le climat méditerranéen. *A. A.*, 1953, p. 245-256.
- (8) DROUINEAU et LEFÈVRE. — Influence du climat méditerranéen sur la teneur en azote minéral dans les sols calcaires. *C. R. A. A.*, 1951, p. 200.
- (9) CLARK (K. G.), YEE (J. Y.), LOVE (K. S.). — Nouvel engrais azoté synthétique. Préparation et propriétés de l'urée-formaldéhyde. *Ind. Eng. Chemistry*, juillet 1948.
- (10) CLARK (K. G.), YEE (J. Y.), LOVE (K. S.), BOYD (T. A.). — Préparation et propriétés de l'urée-formol. *Ind. Eng. Chemistry*, avril 1951.
- (11) CLARK (K. G.), YEE (J. Y.), GADDY (V. L.), LUNDSTROM (F. O.). — Relations de solubilité et caractéristiques de nitrification de l'urée-formol. *Agr. and Food Chemistry*, février 1956.
- (12) MARVEL (C. S.), ELLIOTT (J. R.), BOETTNER (F. E.), YUSKA (M.). — *J. Am. Chem. Soc.*, 1946, 68.
- (13) KRALOVEC (R. D.) et MORGAN (W. A.). — Produits de condensation de l'urée-formaldéhyde comme engrais à disponibilité d'azote contrôlée. *Agric. and Food Chemistry*, janvier 1954.
- (14) YEE (J. Y.), LOVE (K. S.). — Nitrification des produits à réaction urée-formaldéhyde. *Soil. Sci. Soc. Proc.*, 1946, vol. II.
- (15) FULLER (W. M.) et CLARK (K. G.). — Études microbiologiques sur les préparations d'urée-formaldéhydes. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1947, vol. 12.
- (16) ARMIGER (W. H.), FORBES (I.), WAGNER (R. E.) et LUNDSTROM (F. O.). — L'urée-formol. Engrais à disponibilité contrôlée. Expérience avec l'herbe à gazon. *J. Amer. Soc. Agron.*, 1948, 40.
- (17) ARMIGER (W. H.), CLARK (K. G.), LUNDSTROM (F. O.), BLAIR (A. E.). — L'urée-formol. Expériences en serre sur Ray Grass. *Agronomy*, journal mars 1951.
- (18) MUSSER (H. B.), WATSON (J. R.), STANFORD (J. P.) et HARPER (J. E.). — Emploi de l'urée-formol et d'autres engrais azotés sur le gazon. *Bulletin Pennsylvania State University School of Agriculture*, septembre 1951.
- (19) CHAMPION (J.) et PELEGRIN (P.). — L'urée-formol utilisé en bananeraie. *Fruits d'Outre-Mer*, août-septembre 1955.