

Cultiver sans Fertilisants ?

Olivier Barbié*

06 janvier 2007

Révisé le 11 mars 2007

Document de travail

* Président de l'Institut Technique d'Agriculture Naturelle.

RÉSUMÉ

Masanobu Fukuoka en jeté les bases de l'agriculture naturelle en posant quatre principes ("pas de fertilisants", "pas de pesticides", "pas de labour", "pas de sarclage"). Il les a testé lui-même en pleine terre, durant 40 ans, en produisant du riz, du blé et de l'orge (Fukuoka, 1985).

Nous démontrons théoriquement à l'aide des équations bilan utilisées pour les fumures minérales et humiques, appliquées à la monoculture du blé sur de grandes surfaces et sur de longues périodes, que cette méthode peut effectivement produire autant que l'agriculture conventionnelle chimisée.

Dans ces conditions, il faut s'attendre à ce que non seulement l'agriculture naturelle soit aussi productive que l'agriculture chimisée intensive mais qu'en outre elle contribue à puissamment régénérer les sols.

Cependant, pour obtenir ces résultats qui semblent extraordinaires à ceux qui n'ont pris le temps ni de faire l'expérience ni d'interroger la théorie agronomique, l'agriculture naturelle doit tout de même se soumettre à des conditions strictes qui n'avaient pas été retenues par son fondateur : notamment l'introduction d'engrais phosphatés et potassiques lorsque la roche mère n'en libère pas suffisamment.

Sous ces conditions, elle permet des récoltes importantes sans menacer l'équilibre humique des sols et, ce qui n'est pas accessoire, sans aucune pollution.

En 1985, Masanobu Fukuoka a démontré par ses expériences en pleine terre, durant 40 ans, qu'il était possible de produire du riz, mais aussi du blé et de l'orge, sans employer aucun intrant, y compris des fertilisants.

Ses principes de culture, épaulés par une connaissance très fine de la microbiologie, sont pour le moins radicaux : pas de fertilisants¹, pas de pesticides, pas de labour, pas de sarclage. Aussi curieux soient-ils, les fondements de ce qu'il est convenu d'appeler l'agriculture naturelle, obligent à la réflexion.

Cependant, les divers ouvrages de Fukuoka, y compris *L'agriculture naturelle*², laissent diverses questions majeures en suspens : peut-on appliquer ces principes durablement ? Peut-on les appliquer quelle que soit la surface cultivée ? Et surtout, sont-ils valables pour toutes les espèces cultivées en grande culture ?

Il est à peu près certain que l'œuvre de ce pionnier est restée confidentielle uniquement à cause de ces incertitudes. Or, il n'existe que deux façons de les lever : l'expérimentation ou la mise en œuvre d'un modèle théorique. De côté de l'expérimentation, Fukuoka n'a jamais dépassé le stade de la parcelle expérimentale puisqu'il n'a cultivé qu'une sole réduite de moins d'un hectare et seulement pendant 40 ans. Ce qui est fort dommage, car le protocole expérimental nécessaire pour étendre ses résultats à de grandes surfaces sur de longues

¹ Les traducteurs français ont traduit "pas d'engrais". Mais c'est contraire à l'usage qui distingue deux catégories de fertilisants : les engrais et les amendements. Les amendements sont des fertilisants apportés dans le but de modifier la nature du sol : ceux qui apportent du sable, de l'argile ou du calcaire sont appelés respectivement amendements sableux, amendements argileux et amendements calcaires ; quant aux fertilisants qui génèrent de l'humus (paille, compost, fumier) ils sont classés parmi les amendements humiques. Certains amendements peuvent être mixtes comme les apports de marne qui apportent à la fois de l'argile et du calcaire. Par définition, tous les fertilisants qui ne sont pas des amendements sont des engrais. Donc, même si la dolomie apporte du magnésium, elle est rangée dans la catégorie des amendements calcaires. De même, le fumier qui amène à peu près tous les sels minéraux nécessaires aux cultures, est classé parmi les amendements humiques uniquement parce qu'il a une influence directe sur le taux d'humus du sol.

² FUKUOKA 1985.

périodes et à toutes les cultures serait extrêmement coûteux. Quant au modèle théorique, Fukuoka s'est bien gardé de l'élaborer, lui qui a toujours vilipendé la science hypothético-déductive.

La réponse à chacune de ces questions passe donc par la modélisation de cette phytotechnie très particulière dans le strict cadre de l'agronomie scientifique, c'est-à-dire des équations bilan servant au calcul des fumures. Cependant, si la modélisation ne pose pas en soi de difficultés majeures, les techniques nécessaires à la généralisation de l'agriculture naturelle à la plupart des espèces de plein champ sur des surfaces importantes sont plus délicates à mettre à oeuvre.

Dans cet article nous testerons uniquement la première partie de notre programme, à savoir, vérifier dans quelles conditions il est possible de cultiver durablement sans apports de fertilisants.

Plusieurs étapes sont nécessaires à la réalisation de ce projet : décrire le plan de fumure, préciser le bilan humique, construire un modèle et estimer la production permise à l'équilibre.

I/ Le plan de fumure

Sur la base des travaux du Baron Justus Von Liebig, le plan de fumure s'appuie sur une succession de bilans annuels recensant les apports et les pertes en éléments fertilisants.

Deux formulations sont fréquentes, au moins pour l'azote : l'équation du bilan de masse et l'équation avec Coefficient Apparent d'utilisation (CAU).

1) Les équations bilan usuelles

a) équation du bilan de masse

D'après le COMIFER (1987), l'équation du bilan de masse est la suivante :

Apport total = besoin - offre du milieu + reste à la récolte

$$X + Xa = (Ef - Eo) - (Ro + Mr + (Mhb + Mha + Mhp) \times t) + Rf$$

avec

$X =$	Fumure de synthèse
$Xa =$	Fumure sous forme organique : effet direct en équivalent engrais minéral (noté aussi Ma)
$Ef - Eo =$	Besoin du peuplement végétal entre l'ouverture Eo et la fermeture Ef du bilan (noté aussi $b \times y$ avec b la teneur en élément de la récolte et y le rendement)
$Rf =$	Reliquat à la fermeture du bilan
$Ro =$	Reliquat à l'ouverture du bilan (noté aussi Rh)
$Mhb =$	Minéralisation nette de l'humus
$Mha =$	Minéralisation supplémentaire par arrière-effet, due à l'apport régulier d'amendements organiques (souvent négligée)

Mhp = Minéralisation supplémentaire due au retournement des prairies (souvent négligée)
 Mr = Minéralisation nette des résidus de récolte
 t = Coefficient pour tenir compte du temps d'occupation du sol par la culture (compté pour 1 par approximation)

b) équation avec Coefficient Apparent d'utilisation (CAU)

$$Ef - Eo = CAU \times (X + Xa)$$

Cette seconde équation n'est en fait qu'une approximation de la première. Nous la délaisserons donc.

c) Équation retenue

Les équations précédentes négligent plusieurs apports, en particulier les différentes voies de fixation de l'azote atmosphérique ainsi que les pertes par lessivage.

Ces choix sont tout à fait justifiés dans le cas de cultures sur labour et sans associations végétales. Mais ils doivent être vérifiés dans tous les autres cas. D'où l'équation bilan de masse suivante.

Notons E l'élément fertilisant en question.

Réserve du sol	E_{sto}	Ro
Fourniture due aux précipitations	E_{ion}	
Fourniture due aux bactéries du sol	E_{atm}	
Minéralisation de l'humus	E_{min}	$Mhb + Mha + Mhp + Mr$
Fixation par les micro-organismes symbiotiques	E_{fix}	
Fertilisants	$E_{fer} = E_{eng} + E_{ame}$	$X + Xa$
Restitutions des cultures	E_{res}	Rf
Mobilisation par humification	E_{hum}	
Pertes par lessivage	E_{les}	
Exportations lors des récoltes	E_{rec}	$Ef - Eo$

Apport total = besoin - offre du milieu + reste à la récolte

$$E_{eng} + E_{ame} = E_{rec} - E_{sto} + E_{ion} + E_{atm} + E_{min} + E_{fix} - E_{hum} - E_{les} + E_{res}$$

2) Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont retenues.

a) Comparaison statique

Par hypothèse, nous n'envisagerons qu'une situation de monoculture menée sur une longue période (plusieurs générations) en veillant à ce que tous les paramètres tels qu'acidité, taux d'humus, réserves minérales et fertilisation du sol restent inchangés.

En ce qui concerne les besoins en éléments fertilisants, nous prendrons le problème à l'envers. Au lieu de définir *a priori* les besoins de la culture de façon à atteindre un rendement imposé par des impératifs économiques, nous évaluerons le rendement permis par le système en équilibre.

Dans le cas des céréales à paille, nous considérerons que toutes les pailles seront enfouies.

En situation d'équilibre de long terme, la loi des avances ne joue plus et il vient que :

$$\begin{cases} E_{sto} - E_{res} = 0 \\ E_{min} - E_{hum} = 0 \\ E_{eng} + E_{ame} = E_{fer} \end{cases}$$

donc, l'équation bilan s'écrit :

$$E_{rec} = E_{fer} + E_{ion} + E_{atm} - E_{les} + E_{fix}$$

Pour chacun de ces paramètres, il reste à préciser son mode d'estimation.

b) Les paramètres

* Azote ionisé

Les apports dus aux précipitations n'existent que pour l'azote (N). Ils résultent de l'ionisation de l'azote atmosphérique par les éclairs orageux.

Pour tous les éléments, ces apports sont négligeables, donc $E_{ion} = 0$. Sauf pour l'azote : $N_{ion} \geq 0$. Si le climat étant supposé stable, alors N_{ion} est une constante.

* Azote bactérien

Les apports atmosphériques sont constitués par l'azote de l'air fixé directement par les micro-organismes du sol (*Clostridium sp.*, *Azotobacter sp.*³). Par conséquent : $E_{atm} = 0$ mais $N_{atm} \geq 0$. Ces apports sont très sensibles aux conditions du milieu : climat, sol, pratiques culturales, ... Cependant, ces apports sont limités et ils sont généralement estimés par une constante, propre à chaque système agricole, ce qui est d'ailleurs pleinement justifié lorsque le système est stable.

* Azote symbiotique

La fixation d'éléments fertilisants par les micro-organismes symbiotiques (bactéries *Bacillus radicola* = *Rhizobium sp.*⁴) ne concerne, dans le cas des grandes cultures, que les légumineuses (Fabacées) et que le seul élément azote. Par conséquent, pour les cultures de légumineuses ou pour les cultures associées à des légumineuses, $N_{fix} > 0$. Par hypothèse, ces apports seront constants, ce qui correspond à une situation où la légumineuse n'est pas récoltée.

³ GROS 1962 p. 90, SOLTNER 2000 p. 162, SOLTNER 2001 p. 153.

⁴ GROS 1962 p. 87, SOLTNER 2000 pp. 158-159, SOLTNER 2001 p. 155.

* Engrais et amendements

Les apports sous forme d'engrais (qu'ils soient naturels ou de synthèse, apportés seuls ou incorporés à un amendement), notés E_{eng} , sont les plus faciles à prendre en compte et n'appellent pas plus de commentaires.

Par contre, les apports nets sous forme d'amendements humiques (E_{ame}) sont constitués de trois fractions : les minéraux solubles, les minéraux libérés par la minéralisation primaire et ceux libérés par la minéralisation secondaire.

Dans une situation d'équilibre de long terme, ces trois fractions n'ont pas à être distinguées. Du coup, les amendements peuvent être traités comme des engrais et être directement intégrés au bilan en fonction de leur teneur apparente en éléments fertilisants. Dans le même ordre d'idée, les apports liés à l'enfouissement des pailles n'ont pas à être pris en compte puisque la production de paille consomme autant que les restitutions que l'on peut en attendre⁵.

$$E_{fer} = E_{eng} + E_{ame}$$

* Lessivage

Les pertes par lessivage dépendent de nombreux facteurs dont les précipitations, la texture, la structure, la profondeur et la couverture du sol ainsi que de la quantité d'élément solubilisé. Autrement dit, lorsque les conditions édapho-climatiques sont stables, le lessivage dépend de la totalité des apports multipliée par un taux de perte, lui-même fonction de la couverture végétale du sol.

De plus, il est utile de remarquer que, dans les mêmes conditions, le taux de lessivage est différent selon le minéral concerné. S'il est important pour l'azote, le magnésium et le soufre, il est par contre faible pour le potassium et nul pour le phosphore.⁶

Le problème est que ce taux de perte ne peut être connu qu'*a posteriori*, une fois tous les apports évalués. De plus, à ce sujet, la littérature manque.

Il faudra donc se contenter d'une autre méthode, capable d'estimer directement les pertes par lessivage (E_{les}), plus approximative et d'autant moins satisfaisante que les sources d'informations sur le sujet sont rares.

Quoiqu'il en soit, on imagine mal que le lessivage puisse être supérieur à la totalité du stock minéral.

* Exportations

Les pertes par exportation correspondent à la récolte en grain multipliée par sa teneur (toutes les pailles étant restituées).

⁵ Il est évident qu'une partie des minéraux apportés par les pailles de l'année N ne peut pas être restituée à la culture de l'année $N+1$. Cela à cause du lessivage, de la mobilisation des minéraux par la microflore du sol, les adventices et l'humification. Cependant, pour un système à l'équilibre sur une longue période, la mobilisation est une constante. Elle peut donc être éliminée du calcul. Quant au lessivage, il est pris en compte ailleurs.

⁶ GROS 1962 p. 56.

$$E_{rec} = e_{gra} \times Q_{gra} + e_{pai} \times Q_{pai}$$

Avec e_{gra} la teneur en E du grain, e_{pai} la teneur en E de la paille, Q_{gra} la récolte de grain et Q_{pai} la quantité de paille exportée.

Cependant, $E_{rec} = e_{rec} \times Q_{rec}$ lorsque toutes les pailles sont exportées et $E_{rec} = e_{gra} \times Q_{gra}$ lorsque toutes les pailles sont restituées. Ce dernier cas sous-entend une hypothèse un peu osée déjà posée, à savoir que les exportations sous forme de pailles sont totalement couvertes par la minéralisation des pailles. Or, comme nous l'avons déjà dit en note, cela ne peut jamais être le cas ne serait-ce qu'à cause du lessivage. Nos résultats avantageront donc légèrement les pratiques qui enfouissent totalement les pailles par rapport aux pratiques qui les récoltent. Mais au bout du compte, l'écart reste faible.

3) Les fertilisants disponibles

Le bilan de la fumure que nous avons retenu permet d'estimer les exportations potentielles en situation de monoculture en équilibre de long terme :

$$E_{rec} = (E_{ion} + E_{atm} - E_{les}) + E_{fix} + E_{fer}$$

$$\text{avec } A = (E_{ion} + E_{atm} - E_{les})$$

Dans tous les cas, les apports en éléments fertilisants peuvent se faire sous forme d'engrais ou d'amendement.

$$\text{Donc } E_{fer} = E_{eng} + E_{ame}$$

Avec $E_{eng} = Q_{eng} \times e_{eng}$ et $E_{ame} = Q_{ame} \times e_{ame}$ où Q est la, quantité et e la teneur en élément E .

Ce bilan est de forme légèrement différente pour l'azote.

Azote disponible pour les récoltes :

$$N_{rec} = (N_{ion} + N_{atm} - N_{les}) + N_{fix} + N_{fer}$$

Autres fertilisants disponibles pour les récoltes :

$$A_{rec} = A_{fer} - A_{les}$$

4) Premières conclusions

Comme le montrent les bilans à l'équilibre, hormis la fertilité naturelle du sol et la fumure, le seul facteur qui commande la fertilité du sol à long terme est le lessivage (A_{les}). Lutter contre cette perte est donc la première démarche que doit suivre le cultivateur. Cela peut se faire en limitant (semi direct) voire en supprimant définitivement le labour.⁷

Mais la lutte contre le lessivage peut aussi être directe et utiliser des couvres sols organiques (*mulching*) ou bien vivants (permaculture, associations végétales).

⁷ Nous plaçons ici le semi direct avant le labour car nous avons classé les solutions de la plus commune (le semi direct s'est déjà largement développé) à la plus novatrice (la suppression complète du labour, bien que de plus en plus envisagée par les utilisateurs du semi direct, est encore une pratique très minoritaire).

En ce qui concerne les apports d'azote, la méthode de l'association végétale peut permettre de fixer une partie de l'azote atmosphérique par l'utilisation de couvres sols (Fukuoka, 1985) voire d'un couvert arboré constitué de légumineuses (Barbié, 2005). Ceci tend à conforter les démarches d'agriculteurs hétérodoxes partisans de l'agriculture naturelle, de la permaculture ou de A. Pochon. Quant à l'agriculture conventionnelle, elle ne peut faire appel qu'aux engrais minéraux de synthèse.

L'équation bilan montre que, théoriquement, un système agraire quel qu'il soit, mené durablement sans intrants, ne peut rester en équilibre. En effet, il contrevient à la loi dite des restitutions. Accessoirement, cela contredit frontalement les dires de Fukuoka et ruine ainsi définitivement l'agriculture naturelle orthodoxe qui ne peut se passer d'apports en phosphore et potasse, au moins à long terme.

Cette petite équation conduit donc à penser que les réussites de Fukuoka n'ont été possibles que par des prélèvements de courte durée (une génération) d'éléments fertilisants stockés dans le sol (mobilisation des éléments de la roche mère). Or, ces prélèvements ne peuvent pas être maintenus à très long terme. De plus, ils n'existent que dans certains sols (limons, laves volcaniques, marnes dolomitiques, ...) ce qui empêche toute généralisation à des techniques agricoles qui exploitent des sols plus pauvres (sables, arènes granitiques, argiles détritiques acides, ...).

La culture sans intrants ne pourrait devenir un système agraire équilibré qu'avec un lessivage et des récoltes nuls. Il faut donc admettre que, même la forêt climax, modèle de l'agriculture naturelle, ne se maintient qu'en limitant sérieusement le lessivage (litière de feuilles, couvert végétal), en obtenant des sels minéraux extérieurs (limons, fèces d'animaux mobiles) et en ignorant toute forme d'exportation.

En revanche, une fois apportés le phosphore, le potassium et les oligo-éléments, la culture sans apports azotés est envisageable (A. Pochon⁸). Il reste à préciser avec quel rendement et, surtout, avec quel impact écologique, notamment sur la teneur en humus du sol.

II/ La contrainte humique

Le système décrit ci-dessus ne peut prétendre rester en équilibre que dans la mesure où le taux d'humus (h) reste constant. Ce qui signifie que la quantité totale d'humus minéralisé (Hm) doit rester identique à la quantité totale de matière organique humifiée (Hn). Autrement dit, le bilan humique doit rester équilibré.

Or, la quantité de matière organique humifiée dépend de la quantité des amendements humiques (Ha). Il se trouve que sur de grandes surfaces, il est très difficile d'apporter les quantités nécessaires d'amendements humiques. C'est d'ailleurs ce qui pousse beaucoup de céréaliers à enfouir leurs pailles. Mais dans la mesure où le volume de ces pailles dépend du rendement (Q_{gra}), il est nécessaire que le rendement des récoltes soit suffisant pour couvrir les besoins en pailles à restituer.

⁸ POCHON A. : *Les prairies de trèfle blanc*.

Contrainte humique : $Hn = Hm$

Le calcul de la minéralisation de l'humus (Hm) ne pose guère de problèmes :

$$Hm = h \times ps \times ds \times S \times K2$$

avec ps la profondeur de la terre arable, ds la densité apparente du sol, S la surface concernée et $K2$ le taux de minéralisation de l'humus. Les variations les plus importantes sont dues au taux d'humus h , au coefficient $K2$ et dans une moindre mesure à la densité ds du sol.

Par contre, l'humification (Hn) comprend quatre composantes : l'humus généré par les amendements humiques (Hna), l'humus généré par les parties aériennes enfouies - que ce soit par la paille (Hnp) ou par une légumineuse associée (Hnl) - et l'humus généré par les parties souterraines de la culture (Hnr') et de la légumineuse associée (Hnr'').

$$Hn = Hna + Hnp + Hnl + Hnr' + Hnr''$$

Chacune de ces composantes est le produit d'une quantité (Q .) et d'un coefficient appelé coefficient isohumique noté $K1$. Quant aux composantes Hnr , elles sont complexes et proportionnelles aux productions.

De sorte que :

$$\left. \begin{aligned} Hnp &= Q_{pai} \times K1' \\ Hnl &= Q_{leg} \times K1'' \\ Hna &= Q_{ame} \times K1''' \\ Hnr' &= f_1(Q_{pai}) \\ Hnr'' &= f_2(Q_{leg}). \end{aligned} \right\}$$

La contrainte d'équilibre humique s'écrit alors :

$$K1' \times Q_{pai} + K1'' \times Q_{leg} + K1''' \times Q_{ame} + f_1(Q_{pai}) + f_2(Q_{leg}) = h \times ps \times ds \times S \times K2$$

III/ Détermination des rendements liés à l'azote

Puisque le seul facteur qui pourrait être fourni en quantité suffisante par le sol est l'azote, c'est de lui que nous allons faire dépendre les rendements. Autrement dit, nous le considérerons comme le facteur limitant du système.

La fertilité du sol, exprimée en kilogrammes d'azote pur (N_{rec}), permet un rendement en grain potentiel noté Q_{gra} .

Ce rendement s'écrit :

$$Q_{gra} = \frac{N_{rec}}{\gamma_N}$$

où γ_N est la quantité d'azote nécessaire à la production d'une tonne de grain.

Deux difficultés viennent s'introduire ici : la prise en compte des associations culturales et l'effet de la loi de Mitscherlich.

1) Prise en compte des associations culturales et de la loi de Mitscherlich

a) Cas des associations culturales

Une première difficulté apparaît lorsqu'il s'agit d'intégrer des associations végétales au système agraire, condition nécessaire pour obtenir une valeur positive de N_{fix} (azote fixé par les Rhizobiums).

L'azote fixé peut l'être, par exemple, dans le cadre de l'association entre une grande culture (céréale ou oléagineuse) et un couvre sol de légumineuse (trèfle blanc, ...). Cela ne remet pas en cause l'hypothèse de monoculture mais complique le calcul des apports.

Premièrement, une partie des minéraux disponibles est consommée par le couvre sol. Mais cet effet est gommé à long terme. Ensuite, la concurrence entre les deux espèces s'étend à d'autres domaines tels que l'espace, la lumière et l'eau.

Il est très difficile de schématiser ce type de relations. Néanmoins, à partir de nombreuses observations personnelles menées en plein champ dans le Lot (France) de 1990 à 2000, nous avons élaboré un coefficient d'association (β) qui permet de tenir compte approximativement de ces interactions.

Le coefficient d'association (β) représente l'impact réciproque des cultures associées lorsqu'elles sont en mélange parfait, sachant que la valeur maximale de cette densité dépend de la façon dont les plantes occupent l'espace, c'est à dire la strate écologique qu'elles colonisent : strate arbustive⁹ (pommier, amandier, prunier, ...), strate herbacée¹⁰ (blé, maïs, ray-grass, luzerne, ...) et strate sous-herbacée (trèfle, lotier, fraisier, ...).

Nos observations ont montré que ce coefficient est sensiblement égal à :

$$\beta = \left(\frac{1}{\sqrt{2} \times n'} + 0,3 \right) \times \frac{1}{n''} \times \frac{1}{1 + n'''}$$

avec n' le nombre de strates herbacées (comprendre non arbustives) totalement occupées (il en existe deux : < 50 cm de haut et > 50 cm de haut, n' varie donc de 1 à 2, il n'y a pas de prise en compte possible des valeurs intermédiaires), n'' le nombre d'espèces ou de variétés de la strate herbacée la plus haute (quelle que soit sa hauteur) et n''' le taux d'occupation de la strate arbustive (0 si elle est vide, 1 si elle est totalement occupée, 0,5 si elle ne l'est qu'à moitié, ...).¹¹

⁹ Il serait plus juste de parler de strate ligneuse.

¹⁰ Les strates non ligneuses (herbacée et sous-herbacée) sont peuplées de végétaux dépourvus de lignine.

¹¹ Donc $\beta = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2} \times n'} + 0,3 \right) \times \frac{1}{n''}}{2}$ lorsque $n''' = 1$.

Le coefficient d'association ne s'applique qu'aux récoltes faites à partir de plantes d'une hauteur supérieure à 50 cm (céréales, arbres, ...) et aux espèces basses à conditions qu'elles soient seules dans leur strate. Il tend vers 0 lorsque le nombre de plante et de strates occupées augmente.

Ses variations peuvent être imputées à deux facteurs limitants : la lumière et l'humidité du sol. La plupart des cultures herbacées étant héliophiles, elles sont très négativement influencées par l'ombre des arbres. Mais elles sont aussi très dépendantes de l'eau. Or, le puissant système racinaire des ligneuses est pour elles un redoutable concurrent. Ce qui signifie que notre formule ne s'applique que sous deux hypothèses : toutes les plantes concernées sont héliophiles et l'irrigation est inexistante.

Exemples :

β	Blé seul	Blé + trèfle blanc	Trèfle blanc + RGA	2 blés	3 blés	Trèfle + Lotier + 2 blés	Trèfle + Lotier + 2 blés + verger
n'	1	2	1	1	1	2	2
n''	1	1	2	2	3	2	2
n'''	0	0	0	0	0	0	1
β	1	0,65	0,5	0,5	0,34	0,33	0,16

Il suffit ensuite de multiplier le rendement potentiel $\hat{Q}_{gra}$ d'une variété cultivée seule par le coefficient d'association pour obtenir le rendement anticipé de cette même variété, mais cultivée cette fois en association (le raisonnement est le même pour les couvre sols de légumineuses).

$$Q_{gra} = \beta \times \hat{Q}_{gra}$$

b) La loi de Mitscherlich

Il est de notoriété publique que la loi des rendements moins que proportionnels (loi de Turgot) s'applique à l'utilisation des fertilisants par les cultures. En agronomie, cette loi porte le nom de loi de Mitscherlich.

Elle signifie que le coefficient Q_{gra} / N_{fer} , qui représente l'efficacité de la plante vis-à-vis de l'azote disponible, varie en diminuant au fur et à mesure que la fourniture en azote minéral augmente.

Prenons un exemple simple, celui d'une vieille variété de blé¹² :

Q_{gra} en t	N_{fer}	Q_{gra} / N_{fer} ¹³
2,1	0	-
2,82	40	70
3,14	60	52
3,4	80	42
3,58	100	36
3,66	120	30
3,62	140	26

Source : André Gros¹⁴

Il faut remarquer que le coefficient Q_{gra} / N_{fer} tend vers 0 lorsque le rendement Q_{gra} augmente. Mais il existe une limite naturelle : le coefficient Q_{gra} / N_{fer} ne peut pas être inférieur à la limite k_N donnée par :

$$k_N = Q_{gra} \times n_{gra} + Q_{pai} \times n_{pai}$$

Avec un rapport grain / paille de 2/3 et des teneurs habituellement retenues par A. Gros de $n_{gra} = 19$ N/t et $n_{pai} = 5$ N/t, alors $k_N = 26,5$ N/t de grain.

Mais, comme nous le verrons plus loin, $k_N = \{19,5, \dots, 28,5\}$ N/t de grain.

Q_{gra} en t	N_{fer}	$k_N \times Q_{gra}$	$(k_N \times Q_{gra}) - N_{fer}$
2,1	0	56	56
2,82	40	75	35
3,14	60	83	23
3,4	80	90	10
3,58	100	95	-5
3,66	120	97	-23
3,62	140	96	-44

À l'aide de ce petit tableau, il est apparaît clairement que le rendement de 2,1 t/ha/an s'obtient uniquement avec les réserves du sol, estimées dans cet exemple à 56 N.

Au-delà de ce rendement minimal, les suppléments d'azote minéral ne permettent pas d'obtenir un rendement supplémentaire proportionnel. Il existe même un seuil au-delà duquel, l'azote minéral supplémentaire entraîne une baisse du rendement (à cause de la loi des minimums et des phénomènes d'antagonisme).

¹² Pour le riz, voir Lacharme Marc (2001) : « La fertilisation minérale du riz », *Memento Technique de Riziculture*, n°6., Marc Lacharme, 2001.

En ligne sur http://www.arid-afrique.org/IMG/pdf/Fertilisation_minerale.pdf.

¹³ Dans tous nos calculs, les quantités d'engrais sont données en quantité d'équivalent engrais minéral et exprimées en unités fertilisantes. Ces unités valant, par exemple : 1 N = 1 kg N, 1 K = 1 kg K₂O, 1 P = 1 kg P₂O₅. Le choix N = 1 kg N étant assez problématique car l'azote du sol se trouve sous d'autres formes minérales comme NH₃, NO₂ et NO₃. C'est justement cette diversité qui conduit les praticiens à retenir la définition suivante : N = 1 kg N pur. Cf. SOLTNER 2000 p.385.

¹⁴ GROS 1962 p. 242.

Q_{gra} en t	N_{fer}	$N_{rec} = N_{fer} + 56$	N_{rec} / Q_{gra}
2,1	0	56	28
2,82	40	96	34
3,14	60	116	37
3,4	80	136	40
3,58	100	156	44
3,66	120	176	48
3,62	140	196	54

Le problème se complique encore lorsque l'on compare plusieurs variétés. Par exemple, dans l'exemple d'A. Gros, le rapport optimal N_{fer} / Q_{gra} est de $131,5 \text{ N} / 3,764 \text{ t} = 34,9 \text{ N/t}$.

Mais avec des variétés plus productives comme celles citées par D. Soltner, les valeurs sont différentes. Par exemple, le couple $170 \text{ N} / 6 \text{ t} = 28,3 \text{ N/t}$ est proche de la valeur moyenne habituellement retenue de nos jours de 30 N/t .

Il est donc nécessaire d'exprimer la courbe de Mitscherlich sous forme indicée :

Q_{gra} en t	$Q_{gra} / Q_{gra} \text{ max}$	N_{rec} / Q_{gra}	$\lambda_N = (N_{rec} / Q_{gra}) / k_N$
	0^+	$k_N = 26,5$	1
2,1	0,56	28	1,05
2,82	0,74	34	1,28
3,14	0,83	37	1,4
3,4	0,9	40	1,51
3,58	0,95	44	1,66
3,66	0,97	48	1,81
3,764	1	49,8	1,88
3,62	0,96	54	2,04

Grâce à ce tableau, on montre que le couple $170 \text{ N} / 6 \text{ t}$ s'applique à une variété dont la production maximale est de 1,33 fois supérieure à la précédente, soit de 8 t/ha/an , et que cette production maximale est permise par une fertilité azotée de 400 N/ha/an .

Pour le blé, et en fonction de l'azote, la relation est alors sensiblement de la forme

$$\lambda_N = 17,374 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra} \text{ max}} \right)^3 - 37,529 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra} \text{ max}} \right)^2 + 27,919 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra} \text{ max}} \right) - 5,8671$$

Avec $\frac{Q_{gra}}{Q_{gra} \text{ max}} \leq 1$ et $\lambda_N \geq 1,05$.

On pose $\gamma_N = k_N \times \lambda_N$.

Il faut remarquer que γ_N , pour une fertilisation donnée, est inversement proportionnel au potentiel génétique de la variété.

On en déduit que :

- $\gamma_N \approx k_N$ pour $\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} < 0,6$
- $\gamma_N \approx 1,2 \times k_N$ dans une situation optimale où $\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \approx \frac{2}{3}$
- $\gamma_N \approx 1,9 \times k_N$ dans une situation maximale où $\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \approx 1$.

Le rendement attendu s'exprime alors ainsi :

$$Q_{gra} = \frac{\beta \times N_{rec}}{\lambda_N \times k_N}$$

2) Modèle

Notre modèle de statique comparative à long terme se résume alors aux équations suivantes :

* Le rendement permis par la fertilité du sol est donné par :

$$Q_{gra} = \frac{\beta \times E_{rec}}{\lambda_E \times k_E}$$

* Avec le coefficient d'association :

$$\beta = \left(\frac{1}{\sqrt{2} \times n'} + 0,3 \right) \times \frac{1}{n''} \times \frac{1}{1 + 2 \times n'''}$$

* l'élément fertilisant le moins abondant par rapport aux besoins de la plante (facteur limitant) :

$$E_{rec} = (E_{ion} + E_{atm} - E_{les}) + E_{fix} + E_{fer}$$

$$\text{où } E_{fer} = Q_{eng} \times e_{eng} + Q_{ame} \times e_{ame}$$

* la teneur en élément de la plante entière

$$k_E = Q_{gra} \times e_{gra} + Q_{pai} \times e_{pai}$$

* et, pour le blé,

$$\lambda_N = 17,374 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right)^3 - 37,529 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right)^2 + 27,919 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right) - 5,8671$$

$$\text{où } \frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \leq 1 \text{ et } \lambda_N \geq 1,05.$$

Par ailleurs, ce rendement ne peut se maintenir que lorsque la contrainte humique suivante est satisfaite :

$$K1' \times Q_{pai} + K1'' \times Q_{leg} + K1''' \times Q_{ame} + f_1(Q_{pai}) + f_2(Q_{leg}) = h \times (ps \times ds \times S \times K2)$$

Chaque système agricole adopter sa propre stratégie pour tenter de résoudre en insistant plus ou moins soit sur le rendement soit sur l'équilibre.

3) Trois stratégies de résolution

A l'aide du modèle précédent nous allons comparer le rendement possible en blé tendre d'hiver par trois méthodes agronomiques distinctes : l'agriculture chimisée avec labour, l'agriculture biologique avec labour et l'agriculture naturelle de Fukuoka sans labour mais avec association de légumineuse.

La comparaison supposera une parcelle de grande taille (> 100 ha par exemple) de terre à blé (15 à 25% d'argile, humus inférieur à 4%, calcaire inférieur à 5%, pH légèrement inférieur à 7, pas de carences autres qu'en azote), en climat tempéré, sans rotation et sans amendements humiques autres que la totalité des pailles autoproduites, sur une période très longue (> 150 ans).

L'agriculture naturelle utilisera un couvre sol de légumineuse (trèfle blanc) maintenu par des fauches adaptées et des compléments de semis annuels.

a) Stratégie de l'agriculture conventionnelle

La stratégie de l'agriculture chimisée, lorsque toute la fumure est minérale et lorsque toutes les pailles sont enfouies est très simple. Il lui suffit de maintenir le taux d'humus en enfouissant la quantité de paille adéquate. Cette quantité dépend du rendement et est obtenue en apportant les engrais minéraux nécessaires.

Cependant, il suffirait d'apporter des amendements humiques pour que cette contrainte soit levée.

b) Stratégie de l'agriculture naturelle

En agriculture, la fertilisation est nulle. Par contre, son absence est compensée pour partie par une diminution du lessivage grâce à l'absence de labour et au couvert de légumineuse et par une valeur positive de l'azote fixé par les Rhizobiums associés à la légumineuse.

Il s'agit donc de comparer le rendement permis par l'azote aux besoins en humus sachant que la production de paille ne peut pas être stimulée par des apports de fertilisants.

c) Stratégie de l'agriculture biologique

En agriculture biologique, le raisonnement sera le même qu'en agriculture naturelle. D'autant plus que nous n'introduirons pas ici d'engrais biologiques supposant qu'il n'en existe pas actuellement qui soit utilisable à un coût avantageux sur de si grandes surfaces. Mais nous tenterons de lever cette hypothèse restrictive dans l'article suivant.

Mais il apparaît tout de suite que le rendement estimé sera très faible, voire nul.

Toute fois, à la différence de l'agriculture naturelle, l'agriculture biologique a toujours le loisir d'adopter la méthode des associations de légumineuse et d'introduire des engrais et amendements organiques.

IV/ Comparaison des trois systèmes agraires

1) Hypothèses de calcul

La comparaison des trois systèmes agraires nécessite d'introduire dans le système de nombreuses hypothèses et approximations nécessaires au calcul.

a) Paramètres édapho-climatiques

* Les valeurs de l'azote atmosphérique ionisé et de l'azote atmosphérique fixé par les bactéries du sol sont assez variables. Pour ne pas entrer dans des calculs fastidieux, nous prendrons une moyenne approchée de 10 N/an/ha pour ce qui concerne l'azote atmosphérique ionisé.

Par contre, les valeurs de l'azote atmosphérique fixé par les bactéries libres varient en fonction de l'importance de la fumure. Nous retiendrons donc une valeur de 30 N/ans/ha en cas de fumure minérale et une valeur de 10 dans les autres cas.

Sources	Valeurs	Valeurs moyennes
Azote atmosphérique ionisé ¹⁵	5 – 20	12,5
Azote atmosphérique ionisé ¹⁶	5 – 10	7,5
Azote atmosphérique fixé par les bactéries du sol (si $N_{fer} > 0$) ¹⁷	10 – 15 et > 15	12,5 et >
Azote atmosphérique fixé par les bactéries du sol ¹⁸	10 – 50	30

* La densité du sol varie surtout en fonction du taux de calcaire. Elle varie aussi fortement avec la profondeur envisagée. Avec un pH < 7 et une terre équilibrée, la densité sera alors de 1,4 t/m³ avec un taux d'humus normal pour ce milieu de 2,6% (la profondeur de terre arable étant de 23 cm).¹⁹

Il est à remarquer que le taux d'humus ne peut en aucun cas être considéré comme une variable. En effet, il doit être ajusté avec précision aux taux d'argile et de calcaire du sol de façon à faire émerger des complexes argilo-humiques floculés, seuls capables de maximiser la capacité d'échange cationique du sol.

¹⁵ GROS 1962 p. 91.

¹⁶ SOLTNER 2001 p. 153.

¹⁷ SOLTNER 2000 p. 162.

¹⁸ SOLTNER 2001 p. 153.

¹⁹ SOLTNER 2000 p. 156

Par ailleurs, le choix d'une valeur unique pour le coefficient K_2 peut se justifier par le fait que ce coefficient varie essentiellement en fonction de la composition du sol. Avec le sol de notre exemple, le coefficient K_2 devrait être compris entre 1,5% et 1,2%. Nous retiendrons la valeur usuelle de 1,5%.²⁰

Mais le coefficient de minéralisation secondaire dépend aussi de l'intensité de la culture.²¹ Il faut donc s'attendre à ce que la valeur de K_2 soit plus faible en agriculture naturelle sa gestion ressemble plus à celle d'une prairie semi-naturelle qu'à celle d'un champ. Dans cette optique, il faut s'attendre à rencontrer un coefficient K_2 de 1,2%/an en agriculture naturelle.²²

* D'après A. Gros²³, le lessivage nitrique est de 200 à 300 kg en sol nu et de 3 à 80 kg pour un sol cultivé en monoculture. Par contre, D. Soltner²⁴ l'évalue entre 50 et 60 kg pour un sol cultivé avec rotation.

Lessivage	Valeurs moyennes
3 – 80	41,5
50 – 60	55

Nous retiendrons donc la valeur moyenne approchée de 50 kg N/ha/an pour les cultures sur labour. Cependant, le lessivage ne peut en aucun cas être supérieur à la quantité d'azote contenue par le sol. Donc : $N_{les} = 50$ N tant que $N_{les} \leq N_{rec} - N_{les}$.

Pour tenir compte de l'effet de l'association végétale et en l'absence d'indications plus précises sur le sujet, nous diviserons alors la valeur moyenne du lessivage par deux dans le cas de l'agriculture naturelle.

	Formule	Valeur
Agriculture chimisée	$\begin{matrix} 50 \\ \text{si } N_{les} \leq N_{ion} + N_{atm} + N_{eng} \end{matrix}$	50 N
Agriculture biologique	$\begin{matrix} 50 \\ \text{si } N_{les} \leq N_{ion} + N_{atm} \end{matrix}$	20 N
Agriculture naturelle	$\begin{matrix} 50/2 \\ \text{si } N_{les} \leq N_{ion} + N_{atm} + N_{fix} \end{matrix}$	25 N

Remarque : les valeurs retenues pour l'azote ionisé, l'azote bactérien et l'azote lessivé sont vraies, selon nos sources, respectivement à ± 5 N, ± 15 N et ± 10 N. Par conséquent, la valeur de A , comprise entre -10 et 0 , est inférieure à l'amplitude des approximations faites. C'est pourquoi la coutume qui consiste à la considérer comme nulle est bien compréhensible, même si nous ne la suivons pas ici puisque nous retiendrons $A = \{-10, 0, -5\}$.

b) Paramètres culturaux

²⁰ GROS 1962 pp. 117 et 120, SOLTNER 2000 p. 302.

²¹ SOLTNER 2000 p. 155.

²² M. QUENUM, M. GIROUX et R. ROYER 2004.

²³ GROS 1962 p. 130.

²⁴ SOLTNER 2000 p. 425.

Le choix des paramètres culturels est beaucoup plus délicat parce que ces données sont très difficiles à apprécier, principalement par manque d'expériences suffisamment nombreuses et suivies les concernant.

* La stratification végétale ne pose pas de problème et permet le calcul du coefficient d'association que nous avons spécifié.

Dans le cas de Fukuoka comme dans le notre, une grande culture est associée à une petite légumineuse (trèfle blanc par exemple). La grande culture occupe la strate herbacée et la légumineuse la strate sous-herbacée. Donc $n' = 2$. Comme il n'y a qu'une seule espèce par strate, $n'' = 1$. Le coefficient d'association est alors de 0,65. Par conséquent, le rendement espéré est égal au rendement potentiel multiplié par 0,65.

* Par contre, les apports d'azote par fixation sont quant à eux plus imprécis.

En ce qui concerne l'azote symbiotique, les avis divergent : A. Gros et de D. Soltner annoncent :

Effet des légumineuses	Valeurs	Valeur moyenne
A. Gros ²⁵	50 – 60 – 100	75
D. Soltner ²⁶	50 – 100	75

Effet des légumineuses ²⁷	Valeurs	Valeur moyenne
Trèfle	45 – 673	183
Luzerne	56 – 463	200
Lupin	145 – 208	176
Fèverole	45 – 552	210
Poids	52 – 77	65
Lentilles	88 – 114	101
Soja	1 – 168	75

En appliquant au trèfle un coefficient d'association $\beta = 0,65$ on obtiendrait une valeur de 119 N/ha/an.

Il est aussi possible d'utiliser les résultats obtenus par A. Pochon au sujet des prairies artificielles.

Par exemple, avec une prairie composée à 50% – 55% de trèfle blanc (TB) et à 45% – 50% de ray-grass anglais (RGA)²⁸, il a obtenu entre 10 et 12 t de MS²⁹ soit l'équivalent du rendement d'une graminée seule (RGA) avec une fumure de 400 N/ha/an.³⁰ On en déduit donc qu'à long terme, le trèfle fixe dans ces conditions l'équivalent de 400 N/ha/an. Ce qui n'est pas tout à fait

²⁵ GROS 1962 p90.

²⁶ SOLTNER 2001 p.153.

²⁷ SOLTNER 2001 p.156.

²⁸ SOLTNER 1987 p. 161.

²⁹ SOLTNER 1987 p. 159.

³⁰ SOLTNER 1987 p. 157. Si l'on considère le TB et le RGA comme deux plantes herbacées occupant la même strate, le coefficient d'association β est alors de 0,5 pondéré par le taux d'occupation mesuré, ici 50 à 55% pour le TB.

vrai car le volume d'azote fixé est inversement proportionnel aux réserves azotées du sol. Cependant, nous retiendrons tout de même cette valeur faute de données plus précises.

Ramené à une culture de trèfle couvrant 100% de la surface, il pourrait sembler, a priori, que l'azote fixé puisse être au maximum de $400 \text{ N} / 55 \% = 727 \text{ N}$. Or, cette valeur est supérieure aux exportations totales possibles puisque :

$$8 - 10 \text{ t de MS/ha/an de trèfle à } 40 \text{ N/t}^{31} \text{ de MS} = 320 - 400 \text{ N}$$

Même en tenant compte de la loi de Mitscherlich, le résultat est très inférieur à la valeur supposée de 727 N. Par conséquent, il faut concevoir l'apport de 400 N/ha/an par le trèfle comme un maximum, par ailleurs compatible avec la fourchette annoncée par Soltner.

Quant à la valeur minimale, elle est égale à la teneur en azote de la production de trèfle soit dans ce cas à $8 \text{ t de MS/ha/an} \times 0,65 \times 40 \text{ N/t de MS} = 208 \text{ N/ha/an}$.

Par mesure de précaution, nous retiendrons donc une valeur de N_{fix} = comprise entre 183 et 320 N/ha/an. Ces valeurs étant supérieures à celles que nous avons observées nous-mêmes³², nous considérerons dans nos calculs que la valeur courante est de 183 N.

* La fertilisation azotée sous forme d'engrais chimiques est nulle en agriculture naturelle conformément au principe "pas de fertilisants". Par contre, les pailles seront toutes laissées à la surface du sol.

En agriculture biologique, la fumure sera identique mais enfouie. D'une part parce que les amendements contenant de l'azote sont rares (fumiers, composts), plus encore lorsqu'on exige d'eux qu'ils soient eux aussi issus de l'agriculture biologique. Ensuite, parce que le blé supporte très mal les fumures organiques, et tout particulièrement le fumier. Cela ne veut pas dire que l'agriculture biologique est inapte à la production de blé. Simplement, en situation de monoculture continue (pas de rotations avec les prairies, pas d'engrais verts ni de jachères), elle ne peut lever cet obstacle et doit se contenter d'enfouir les pailles. Un tel constat ne devrait pas choquer outre mesure les héritiers de Sir Albert Howard ou de Rudolf Steiner.

Enfin, pour ce qui concerne l'agriculture chimisée, la fertilisation possible est quasi illimitée. Aussi, c'est le potentiel génétique de la variété cultivée qui fixe seul les bornes.

c) Paramètres variétaux

Les restitutions sous forme d'humus par les racines et les tiges du blé et du trèfle sont difficiles à évaluer. En s'appuyant sur les données proposées par D. Soltner³³, il est tout de même possible d'évaluer les restitutions racinaires à la moitié des restitutions sous formes de parties aériennes (hors graines), avec un $K1$ de 0,15 pour les parties aériennes et souterraines du blé, de 0,15 pour les parties souterraines du trèfle et de 0,1 pour les parties aériennes du trèfle.

³¹ Cette valeur est obtenue en prenant la moyenne des valeurs extrêmes exprimées en matière azotée totale (MAT). Ces valeurs sont 200 et 307 pour mille de MAT sur la MS (pp. 124 à 127). Soit une moyenne de 253,3 ‰. Cette valeur moyenne est ensuite convertie en lui appliquant le taux de 16% de N (p. 191). Soit une moyenne pour le trèfle blanc de 40,56 N/t de MS, arrondie par nous à 40,56 N/t de MS.

³² Voir le détail du calcul en annexe.

³³ SOLTNER 2000 p. 302.

Cependant, comme le trèfle reste en place, il sera nécessaire de diviser par deux ses restitutions racinaires³⁴.

$$f_1(Q_{pai}) = \frac{Q_{pai}}{2} \times 0,15$$

$$f_2(Q_{leg}) = \frac{Q_{leg}}{4} \times 0,1$$

Nous retiendrons pour le trèfle une production moyenne de 8 t/an/ha de matière sèche (MS) soit, après affectation du coefficient d'associations de 0,65, une production de 5,2 t/an/ha.

Enfin, la quantité de paille produite n'étant pas liée à la production de grain, nous devons prendre une valeur quelconque : "la production de paille (...) est un critère propre à chaque variété de blé. (...) Les études montrent que la production de paille est indépendante du rendement grain"³⁵

Par exemple, pour un rendement de 9 t/ha/an, la variété Record produit 13,7 t/ha de paille alors que la variété Aztec n'en produit que 7,5 t/ha.³⁶ Ce qui donne des rapports paille grain de 1,52 à 0,83 avec une valeur moyenne de 1³⁷. Mais d'autres auteurs suggèrent des rapports paille / grain plus extrêmes encore de 0,66 à 0,9³⁸.

Dans nos calculs, nous retiendrons une variation de 0,8 à 1,5, sans pour autant considérer que la valeur inférieure est à associer à une variété d'obtention plus ancienne³⁹.

Par hypothèse encore, la teneur en azote du grain est de 19 kg N pur⁴⁰ à 20 kg N pur⁴¹ par tonne de MS et de 5 à 6 kg de N par tonne de paille⁴². Le taux de matière sèche du blé est d'environ 86% et celui de la paille de 88%⁴³.

Nous considérerons que le rendement maximal Q_{gramax} peut atteindre 10 t/an/ha en zone non irriguée. La moyenne française étant actuellement de 7 t/ha, celle des Pays-Bas, terroir plus humide, plus tempéré et cultivé de façon plus intensive étant souvent proche de 9 t/ha.⁴⁴

³⁴ M. QUENUM, M. GIROUX et R. ROYER 2004.

³⁵ ITCF, ADEME (1998) : "Résidus de culture : Paille de Céréale", *Etude Agrice*

³⁶ Béatrice CARLIER (2002) *Jeunes Agriculteurs*, n°573.

³⁷ WARNAN et al 2006, en tenant compte que 50% de la paille produite ne peut être récoltée.

³⁸ ADEME, ITCF, 1998 : Etude Agrice "Blé plante entière".

³⁹ LE VILLIO M. et al. , 1996.

⁴⁰ SOLTNER 2000 pp. 374 et 427.

⁴¹ *Tables de l'alimentation* de l'INRA, p. 174.

⁴² La première valeur est communément admise. Quant à la seconde, égale à 5,6, elle est obtenue à partir des *Tables de l'alimentation* de l'INRA, p. 170. LE VILLIO (1996) et al. Proposent 6N/t de MS de paille.

⁴³ *Tables de l'alimentation* de l'INRA, pp. 170 et 174.

⁴⁴ Base de donnée FAO consultable sur <http://faostat.fao.org>.

d) Tableau récapitulatif

Paramètres			Agriculture chimisée	Agriculture biologique	Agriculture naturelle
Paramètres édapho-climatiques	N ionisé	N_{ion}	10 N	10 N	10 N
	N bactérien	N_{atm}	30 N	10 N	10 N
	Lessivage	N_{les}	50 N	20 N	25 N
	$N_{ion} + N_{atm} - N_{les}$	A	≈ -10	≈ 0	≈ -5
	Acidité du sol	pH	6,5 – 6,75	6,5 – 6,75	6,5 – 6,75
	Taux d'humus normal	h	2,6%	2,6%	2,6%
	Profondeur arable	ps	0,23 m	0,23 m	0,23 m
	Densité du sol	ds	1,4 t/m ³	1,4 t/m ³	1,4 t/m ³
	Surface unité	S	10 000 m ² /ha	10 000 m ² /ha	10 000 m ² /ha
	Vitesse de minéralisation de l'humus	$K2$	1,5%/an	1,5%/an	1,2%/an
Paramètres culturaux	Strates	n'	1	1	2
	Espèces par strates	n''	1	1	1
	N symbiotique	N_{fix}	0 N	0 N	183 – 320 N
	Fertilisation azotée	N_{fer}	N_{fer} N	0 N	0 N
Paramètres variétaux					
	Taux de matière sèche de la paille		86%	86%	86%
	Taux de matière sèche du grain		88%	88%	88%
	Teneur du grain / t de MS	n_{gra}	19 à 20 N/t	19 à 20 N/t	19 à 20 N/t
	Teneur des pailles	n_{pai}	5 à 6 N/t	5 à 6 N/t	5 à 6 N/t
	Coefficient d'humification de la matière sèche (blé)	$K1'$	0,15	0,15	0,15
	Coefficient d'humification de la matière sèche aérienne (trèfle)	$K1''$	-	-	0,1
	Coefficient d'humification de la matière sèche souterraine (trèfle)	$K1'''$	-	-	0,15
	Rapport paille / grain		0,8 à 1,5	0,8 à 1,5	0,8 à 1,5
	Production de trèfle (en t de MS)	Q_{leg}	0	0	5,2 t/ha/an
	Humus fourni par les racines de blé	Hnr'	$K1' \times Q_{pai}$	$K1' \times Q_{pai}$	$K1' \times Q_{pai}$
	Humus fourni par les racines de trèfle	Hnr''	-	-	0,1 t/an
	Humus fourni par les tiges de trèfle	$Q_{leg} \times K1'''$	-	-	0,26 t/ha/an

2) Résultats

Une fois le modèle spécifié et les valeurs des données et paramètres évaluées, il est enfin possible d'opérer la comparaison voulue.

a) Agriculture chimisée :

Le rendement nécessaire pour satisfaire la contrainte humique est donné par :

$$K1' \times Q_{pai} + K1'' \times Q_{leg} + K1''' \times Q_{ame} + f_1(Q_{pai}) + f_2(Q_{leg}) = h \times (ps \times ds \times S \times K2)$$

La formule adaptée à l'agriculture chimisée est :

$$K1' \times Q_{pai} + f_1(Q_{pai}) = h \times (ps \times ds \times S \times K2)$$

Avec les paramètres retenus, on obtient :

$$0,15 \times Q_{pai} + \frac{Q_{pai}}{2} \times 0,15 = 0,026 \times (0,23 \times 1,4 \times 10.000 \times 0,015)$$

Soit $Q_{pai} = 5,5$ t de MS ou 6,25 t de matière humide.

Avec un rapport paille grain compris entre 0,8 et 1,5, cela signifie que l'équilibre ne pourra être atteint que si la production est de 4,2 à 7,8 t de grain avec une valeur courante de 6,25 t.

Ce rendement minimal suppose une fumure minérale azotée donnée par $Q_{gra} = \frac{\beta \times Nrec}{\lambda_N \times k_N}$.

Ou, une fois adaptée à l'agriculture chimisée :

$$Q_{gra} = \frac{A_N + N_{fer}}{\lambda_N \times k_N}$$

En calculant les valeurs limites de k_N :

$$k_N = Q_{gra} \times n_{gra} + Q_{pai} \times n_{pai}$$

$$k_N = Q_{gra} \times \{19, \dots, 20\} \times 86\% + \{0,8, \dots, 1,5\} \times Q_{gra} \times \{5, \dots, 6\} \times 88\%$$

$$k_N = Q_{gra} \times (\{19, \dots, 20\} \times 86\% + \{0,8, \dots, 1,5\} \times Q_{gra} \times \{5, \dots, 6\} \times 88\%)$$

$$Q_{gra} \times (19 \times 86\% + 0,8 \times 5 \times 88\%) \leq k_N \leq Q_{gra} \times (20 \times 86\% + 1,5 \times 6 \times 88\%)$$

$$Q_{gra} \times 19,9 \leq k_N \leq Q_{gra} \times 25,1$$

et celles de λ_N :

$$\lambda_N = 17,374 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right)^3 - 37,529 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right)^2 + 27,919 \times \left(\frac{Q_{gra}}{Q_{gra \max}} \right) - 5,8671$$

$$\begin{cases} \lambda_N \geq 17,374 \times \left(\frac{4,2}{10} \right)^3 - 37,529 \times \left(\frac{4,2}{10} \right)^2 + 27,919 \times \left(\frac{4,2}{10} \right) - 5,8671 \\ \lambda_N \leq 17,374 \times \left(\frac{7,8}{10} \right)^3 - 37,529 \times \left(\frac{7,8}{10} \right)^2 + 27,919 \times \left(\frac{7,8}{10} \right) - 5,8671 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \lambda_N \geq 0,53 \Rightarrow \lambda_N \geq 1,05 \\ \lambda_N \leq 1,32 \end{cases}$$

$$1,05 \geq \lambda_N \geq 1,32$$

on peut donner une fourchette de la fertilisation nécessaire :

$$\{4,2, \dots, 7,8\} = \frac{-10 + N_{fer}}{\{1,05, \dots, 1,32\} \times \{19,9, \dots, 25,1\}}$$

$$N_{fer} = \{4,2, \dots, 7,8\} \times \{1,05, \dots, 1,32\} \times \{19,9, \dots, 25,1\} + 10$$

$$98 \geq N_{fer} \geq 268$$

Avec une valeur moyenne attendue de

$$N_{fer} = 6,25 \times 1,16 \times 20,7 + 10$$

$$N_{fer} = 160$$

La conclusion s'impose d'elle-même : comme les promoteurs de l'agriculture chimisée le clament depuis plus d'un demi siècle, l'agriculture conventionnelle chimisée est capable de maintenir une monoculture céréalière à un haut niveau de rendement, avec à peu près toutes les variétés disponibles, à condition toute fois qu'elles aient un potentiel génétique suffisant et que les pailles soient enfouies.

b) Agriculture naturelle

Le rendement nécessaire pour satisfaire la contrainte humique est donné par :

$$K1' \times Q_{pai} + K1'' \times Q_{leg} + K1''' \times Q_{ame} + f_1(Q_{pai}) + f_2(Q_{leg}) = h \times (ps \times ds \times S \times K2)$$

La formule adaptée à l'agriculture chimisée est :

$$K1' \times Q_{pai} + K1'' \times Q_{leg} + f_1(Q_{pai}) + f_2(Q_{leg}) = h \times (ps \times ds \times S \times K2)$$

Avec les paramètres retenus, on obtient :

$$0,15 \times Q_{pai} + 0,1 \times 5,2 + \frac{Q_{pai}}{2} \times 0,15 + \frac{5,2}{4} \times 0,1 = 0,026 \times (0,23 \times 1,4 \times 10.000 \times 0,012)$$

Soit

$$0,15 \times Q_{pai} + 0,1 \times 5,2 + \frac{Q_{pai}}{2} \times 0,15 + \frac{5,2}{4} \times 0,1 = 0,026 \times (0,23 \times 1,4 \times 10.000 \times 0,012)$$

$$Q_{pai} = 1,6$$

Soit $Q_{pai} = 1,6$ t de MS ou 1,8 t de matière humide. Ce qui signifie que la production de trèfle couvre presque complètement les besoins en humus.

Avec un rapport paille grain compris entre 0,8 et 1,5, cela signifie que l'équilibre ne pourra être atteint que si la production est de 1,2 à 2,25 t de grain avec une valeur courante de 1,8 t.

Ce rendement minimal suppose une fumure minérale azotée donnée par $Q_{gra} = \frac{\beta \times N_{rec}}{\lambda_N \times k_N}$.

Ou, une fois adaptée à l'agriculture naturelle :

$$Q_{gra} = \frac{\beta \times (A_N + N_{fix})}{\lambda_N \times k_N}$$

Avec les valeurs limites de k_N déjà calculées et en recalculant λ_N on peut donner une fourchette de la fertilisation nécessaire :

$$\{1,2,...,2,25\} = \frac{\beta \times (-5 + N_{fix})}{\{1,05,...,1,05\} \times \{19,9,...,25\}}$$

$$N_{fix} = \frac{\{1,2,...,2,25\} \times 1,05 \times \{19,9,...,25\}}{0,65} + 5$$

$$44 \geq N_{fix} \geq 96$$

Avec une valeur moyenne attendue de

$$N_{fix} = \frac{1,8 \times 1,05 \times 20,7}{0,65} + 5$$

$$N_{fix} = 65$$

Le système agraire géré selon les règles de l'agriculture naturelle est stable dès que les légumineuses associées apportent entre 44 et 96 kg d'azote par hectare et par an, avec une valeur moyenne de 65 N. Or, comme nous l'avons vu, de tels apports sont faibles par rapport au potentiel d'un simple trèfle blanc, qui apporte sans difficulté environ 200 unités d'azote.

Ce qui signifie que l'agriculture naturelle peut assurer indéfiniment une production significative de blé, même en situation de monoculture, à la seule condition que le sol soit suffisamment pourvu en minéraux autres que l'azote.

Cela signifie aussi qu'elle peut, en plus, se permettre le luxe d'exporter une partie de sa production en tige sous forme légumineuse par exemple.

Mais il est possible d'aller plus loin. En effet, comme la seule variable du système est le taux de couverture du sol par le trèfle, il est logique de prévoir que le rendement de blé atteindra

forcément son maximum possible dès que le trèfle sera semé. Cette situation entraînera inévitablement une hausse du taux d'humus.

Le rendement potentiel en grain est donc de

$$Q_{gra} = \frac{\beta \times (A_N + N_{fix})}{\lambda_N \times k_N}$$

$$Q_{gra} = \frac{0,65 \times (-5 + \{183, \dots, 320\})}{1,05 \times \{19,9, \dots, 25,1\}}$$

$$4,4 \geq Q_{gra} \geq 9,8$$

La borne supérieure étant égale au potentiel génétique avec comme valeur la plus probable une production de 5,3 t/ha/an.

Dans ce cas, le taux d'humus devrait se stabiliser vers 4,8 % $\approx$ 5% (lorsque le rapport paille grain est de 1).

Il est tout à fait remarquable que le rendement potentiel moyen de l'agriculture naturelle soit tout à fait comparable à celui de l'agriculture chimisée, du moins lorsqu'elle fait le choix d'être durable.

Rendement d'équilibre (en tonne de grain)	Valeur basse	Valeur moyenne	Valeur haute
Agriculture chimisée	4,2	6,25	7,8
Agriculture naturelle	4,4	5,3	9,8

Par conséquent, M. Fukuoka et ses disciples ont raison de croire leurs propres observations lorsqu'ils constatent que leurs méthodes, aussi hétérodoxes qu'elles puissent paraître, permettent de produire autant que celles de leurs confrères conventionnels. Et ils sont tout aussi fondés à affirmer qu'en plus, leurs pratiques permettent de régénérer les sols en augmentant leur taux d'humus, tandis que bien souvent, l'agriculture conventionnelle n'obtient ses meilleurs rendements qu'en laissant disparaître l'humus des terres arables.

Il est aussi à remarquer que l'agriculture biologique, placée dans les mêmes conditions que l'agriculture naturelle, n'obtiendrait aucun résultat. Autrement dit, elle est, comme l'agriculture conventionnelle, absolument inféodée à la fertilisation azotée.

De telles conclusions, qui ne sauraient surprendre aucun de ceux qui ont pratiqué l'agriculture naturelle, doivent cependant interroger nos agronomes. En effet, l'agriculture naturelle a été conçue en dehors de toute théorie scientifique. Et pourtant, l'expérience comme la théorie montrent qu'elle fait mieux que la phytotechnie scientifique.

CONCLUSION

Comme nous l'avons théoriquement démontré par la méthode des bilans de fumure, l'agriculture naturelle appliquée à la très difficile monoculture du blé, est durable même sur de grandes surfaces, sans utiliser aucun engrais azoté qu'il soit minéral ou organique.

Dans ces conditions, il faut s'attendre à ce qu'elle soit aussi productive que l'agriculture chimisée intensive tout en régénérant les sols.

Mais pour obtenir ces résultats qui semblent extraordinaires à ceux qui n'ont pris le temps ni de faire l'expérience ni d'interroger la théorie agronomique, l'agriculture naturelle doit tout de même se soumettre à des conditions strictes qui n'avaient pas été retenues par son fondateur Masanobu Fukuoka : introduire des engrais phosphatés et potassiques lorsque la roche mère n'en libère pas suffisamment.

Sous ces conditions, elle permet des récoltes importantes sans menacer l'équilibre humique des sols et, ce qui n'est pas accessoire, sans aucune pollution.

Cependant, il reste encore à exposer certains détails techniques et surtout à établir sa validité économique. Toute fois, ainsi comprise, l'agriculture naturelle constitue la plus sérieuse des alternatives tant à l'agriculture conventionnelle qu'à l'agriculture biologique.

ANNEXE

D'après nos observations, le rendement d'une prairie biologique (Aveyron, de 1985 à 2005) est environ deux fois moindre de celui d'une prairie intensive médiocre (Lot, de 1985 à 2005). Par exemple, le rendement d'un ray grass intensif est de 10 – 16 t de MS/ha/an de 8 – 10 t de MS/ha/an pour un trèfle blanc purs. En agriculture biologique, ces rendement passent alors à 5 t pour la graminée et 4 t pour le trèfle. On sait par ailleurs que dans ces conditions, un mélange à 30% de trèfle blanc couvre les besoins de la parcelle⁴⁵. Sachant que les graminées de la prairie ont une teneur azotée voisine de 30 N/t de MS, il est alors possible d'évaluer les apports nets en azote (X) du trèfle blanc. Ceux-ci sont égaux à :

$$5 \text{ t de MS} \times 30 \text{ N / t de MS} \times 70\% = 4 \text{ t de MS} \times X \text{ N / t de MS} \times 30\%$$

$$\text{On trouve } X = 105 \text{ N / 1,2 t de MS} = 87,5 \text{ N / t de MS}$$

Cependant, si le mélange était parfait (50% de chaque espèce), et que l'on introduise alors un coefficient d'association β de 0,5, le résultat serait alors de :

$$5 \text{ t de MS} \times 30 \text{ N / t de MS} \times 0,5 = 4 \text{ t de MS} \times X \text{ N / t de MS} \times 0,5$$

$$\text{soit } X = 75 \text{ N / 2 t de MS} = 37,5 \text{ N / t de MS d'où un apport de } \boxed{150 \text{ N/ha}}.$$

⁴⁵ SOLTNER 2000 p. 161.

BIBLIOGRAPHIE

ARNAUD J, BARLATIER S. (1953) : *Manuel des cours post-scolaires agricoles : Livre des élèves*, éditeur inconnu.

BARBIÉ Olivier (2005) : *Abrégé d'agriculture naturelle*, Éditions Publibook, Paris, 2005.

CARLIER Béatrice (2002) : *Jeunes Agriculteurs*, n°573, juin 2002.

FUKUOKA Masanobu : *L'agriculture naturelle : Théorie et pratique pour une philosophie verte*, Editions de la Maisnie, Paris, 1989.

FUKUOKA Masanobu : *La révolution d'un seul brin de paille : Une introduction à l'agriculture sauvage*, Editions de la Maisnie, Paris, 2005.

FUKUOKA Masanobu : *La voie du retour à la nature : Théorie et pratique pour une philosophie verte*, Éditions Le Courrier Du Livre, 2005.

GROS André : *Engrais : Guide pratique de la fertilisation*, 3^{ème} édition, Éditions La maison rustique, 1962.

HOWARD Sir Albert (1940) : *Testament agricole : pour une agriculture naturelle*, Éditions Vie et Action, Lille, 1971.

INRA (1988) : *Tables de l'alimentation des bovins ovins caprins*.

ITCF, ADEME (1998) : "Résidus de culture : Paille de Céréale", *Etude Agrice*

ITCF, ADEME (1998) : "Blé plante entière", *Etude Agrice*.

LE VILLIO M., ARROUAYS D., DESLAIS W., DAROUSSIN J., LE BISSONNAIS Y., CLERGEOT D. (1996) : "Production de paille, Quelle est l'influence variétale ?", *Perspectives Agricoles*, n°214, juin 1996.

MOLLISON Bill, HOLMGREN David : *Permaculture, tome 1*, Editions Equilibres d'aujourd'hui, 1986.

QUENUM M., GIROUX M. et ROYER R. (2004) : "Étude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturaux sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilisation", *Agrosol*, Décembre 2004, vol. 15, no 2.

SOLTNER Dominique (1987) : *La production de viande bovine*, 11^e édition. Éditions Sciences et techniques agricoles, Sainte-Gemmes-Sur-Loire.

SOLTNER Dominique (2000, 2001) : *Les bases de la production végétale : Le sol, le climat, la plante, Tome I et III*, Éditions Sciences et techniques agricoles, Sainte-Gemmes-Sur-Loire, 2000 pour le tome I et 2001 pour le tome III.

WARNANT G., RABIER F., MARCHAL D., SCHENKEL Y (2006) : "Grains et pailles combustibles : une autre voie de valorisation des céréales." *Livre Blanc "Céréales"*, F.U.S.A. et CRA-W Gembloux.