Du laboratoire «bordure de champs»... à la paillasse : des outils pour comprendre et quantifier l'évolution de la M.O. et l'impact de ses modes de gestion.

Diapo 1 : Bonjour,
Je m'appelle Robert Oliver et ai contribué, après 15 ans d'expérience de gestion des laboratoires OM, à divers projets de recherches centrés sur la caractérisation des matières organiques, de leurs transformations dans les sols et de l'impact de leur apport sur la fertilité des terres. Je vais donc tenter de vous faire partager plus de 20 ans d'expérience au service de projets de terrain en privilégiant les outils plutôt que les concepts et en mettant l'accent sur leur intérêt pratique, les conditions de leur mise en œuvre ainsi que leurs limites. S'agissant d'une « transmission d'expérience », cette présentation sera forcément incomplète dans la démarche et l'éventail des techniques présentées. Espérons toutefois qu'elle sera « utile ».
Diapo 2 : Cheminement général- le cycle de la MO et tout particulièrement celui de N
Tout au long de cet exposé je vais vous parler de choses très diverses : depuis la caractérisation de la M.O.S et des M.O. exogènes jusqu'aux émissions de G.E.S. Aussi, pour donner une cohérence à ce qui pourrait sembler être un inventaire à la Prévert, l'exposé va t'il être articulé autour du cycle de la M.O. dans le sol et tout particulièrement le cycle de N, dont vous avez un aperçu général sur la diapositive présentée. En effet, c'est principalement autour du bilan de N à l'échelle parcellaire dans les agrosystèmes que notre laboratoire s'est investi pour venir en appui à nos collègues outre-mer. Le « bilan carbone » et l'impact des apports organiques ne pourront toutefois pas être ignorés car C et N sont indissociables et le rôle majeur de la M.O.S sur les propriétés d'échange et le « pouvoir tampon » du sol conditionne aussi les voies métaboliques du cycle de N.
Nous examinerons successivement :
- les stocks de N et accessoirement de C ainsi que leur compartimentation,
- les entrées organiques à l'échelle de la parcelle et leur « qualité » ainsi que les transferts entre formes,
- les fuites « en solution » hors du profil agronomiquement intéressant c'est-à-dire essentiellement le « devenir des nitrates »,
- les fuites sous forme gazeuses avec : les pertes par volatilisation de N ammoniacal puis celles par dénitrification.
Chaque étape sera illustrée par des exemples concrets faisant parfois appel aux modèles d'évolution de la MOS pour la compréhension des résultats et leur généralisation.
Diapo 3 : Je tiens tout de même, en préambule à cet exposé, à attirer votre sur les problèmes d'échantillonnage.
Dans notre domaine, quel que soit l'objet d'étude, nous sommes confrontés au problème de la prise d'échantillon, étape essentielle dont dépend la qualité du résultat final, aussi nous allons détailler les étapes de cette opération : Il faudra
1) Préciser la stratification de l'objet d'étude, et on voit ici que le choix peut-être multiple aussi bien au niveau du paysage (zones différenciées…) que de la parcelle (souches, brûlis,…),
2) prélever un ensemble d'échantillons représentatifs de l'objet d'étude et on voit bien sur la diapo de titre que cela s'avère être parfois difficile car l'hétérogénéité peut être considérable et de plus elle peut être cachée. Même s'il existe des moyens statistiques de calculer le nombre de prélèvements élémentaires à réaliser pour

obtenir un échantillon « représentatif », on s'accorde sur la nécessité de réaliser de 8 à 12 carottes par zone homogène pour obtenir cet échantillon.
3) Ce prélèvement doit être fait avec des outils adaptés utilisés selon des règles précises.
Diapo 4 : 4) Les techniques d'échantillonnage sont multiples (géométrique, aléatoire, systématique) et dépendent de la stratégie d'analyse des résultats que l'on envisage d'utiliser par la suite. Les avantages et les inconvénients des choix effectués sont résumés sur cette diapo. Le prélèvement aléatoire peut être inconsciemment subjectif et l'exploitation géostatistique requiert le respect d'un chemin « prédéfini » et un prélèvement quasi-ponctuel.
Diapo 5 : Enfin cet échantillon, qu'il soit issu de carottages ou de prélèvements sur fosses, doit ensuite subir des étapes supplémentaires avant d'être analysé :
- Partitionner cet échantillon pour transmettre au laboratoire un échantillon de taille raisonnable (200g à 1kg). La qualité et le soin apportés à ces opérations sont essentiels pour la réussite de l'expérience.
Au laboratoire, ou de préférence sur le terrain, cet échantillon fera encore l'objet, éventuellement de tamisages avec détermination du taux de terre fine (< 2 mm), d'un quartage pour constituer des sous-échantillons et éventuellement d'un broyage intégral à moins de 200 µm, ce qui ne peut être efficacement réalisé qu'avec un matériel spécialisé.

Si, de plus, on souhaite quantifier un stock, il faut associer une valeur de « teneur massique » en un paramètre d'un compartiment supposé homogène avec la « taille » de ce compartiment. Pour cela il faut :
-choisir un paramètre adéquat pour caractériser la « propriété physico-chimique » que l'on souhaite déterminer (par exemple N total vs N »assimilable » et quel indicateur pour N assimilable)
Choisir une technique d'analyse pour le paramètre à déterminer, ce qui alimentera une bonne partie de la suite du discours.
Pour pouvoir traduire la teneur ainsi mesurée en termes de stocks, il faut associer la teneur massique mesurée à un poids de terre de qualité « analyse (2mm ou 2mm rebroyée) » par unité de surface ce qui nécessite la connaissance de la Da des divers composants et du taux d'éléments inertes de graviers et cailloux des diverses strates de terre concernées.
Si , de plus on souhaite quantifier des évolutions au cours du temps, il faudra s'assurer que la « base d'échantillonnage » est stable entre les prélèvements ainsi que de la fiabilité des techniques analytiques et éventuellement travailler en « masse équivalente » pour tenir compte des variations de Da entre deux prélèvements.
Diapo 6 : Dans un premier temps nous allons présenter quelques techniques qui permettent de « quantifier » les stocks de C et N. Pour le carbone cela recouvre :
Ceci consiste essentiellement :

- dans le dosage du C total et la détermination des stocks de C
- l'intégration du C de la MO à la matrice organo-minérale du sol à travers le fractionnement physique de la MOS

Pour l'azote nous nous intéresserons à ce qui, pour l'agronome et le paysan est primordial c'est-à-dire le rôle de la matière organique comme source d'azote pour la nutrition minérale des végétaux ce qui inclue :

- la taille du réservoir dosage de N total si l'on ose une métaphore banquière « le contenu du coffre fort »

- l'état du disponible à un moment donné dosage de N minéral soit « le contenu du porte monnaie » immédiatement disponible

- l'appréciation de la quantité de N qui a pu être minéralisée pendant une période donnée c'est sur le terrain la minéralisation nette « in-situ » et au laboratoire les tests biologiques, soit toujours par analogie le montant du crédit utilisée

- l'appréciation, à priori, de la quantité de N susceptible d'être minéralisée à plus ou moins long terme : Test de N minéralisable soit par analogie le montant de la ligne de crédit disponible.

Les transferts entre ces divers compartiments (les règles du jeu bancaires) seront eux l'objet de la partie suivante : caractérisation et qualité des MO

Diapo 7 : C'est certainement pour le dosage de C total que l'évolution des techniques d'analyses a eu le plus de conséquences sur les conclusions tirées des suivis dans le temps (diachroniques). Historiquement se sont succédées :

Des techniques chimiques de mesure d'oxydo-réduction à froid (Wakley et Black) ou à chaud (Anne) par le bichromate de potassium avec des prises d'essai de l'ordre du gramme à la dizaine de grammes, réaction dont le rendement n'est pas total (60% à 95%) et varie selon les conditions d'application et les sols

Une technique de combustion totale en four à moufle ou à induction dans un flux d'oxygène avec piégeage des oxydes gênants et de l'eau puis mesure par conductibilité thermique différentielle du CO_2 formé après, pour les appareils récents, séparation chromatographique des gaz de combustion. Cette technique impose des prises d'essais qui, dans les débuts étaient de l'ordre de 100 à 500 mg au maximum et qui, maintenant sont plutôt de l'ordre de la dizaine de mg. C'est dire si la « qualité » du broyage de l'échantillon dont est issu la prise d'essai est importante alors que le poste de « préparateur des échantillons » est, dans un laboratoire de routine, souvent le plus ingrat.

Il est donc indispensable de connaître les méthodes d'assurer un « calage » des diverses techniques entre elles pour pouvoir discuter des évolutions à partir de résultats issus de banques de données plus ou moins anciennes. Si parfois ces calages sont rassurants (graphe) cela n'est pas la généralité.

Si l'on veut discuter des évolutions de stocks au cours du temps (diachronie) ou entre parcelles proches au passé différent à un instant donné (synchronie) il faut veiller à la signification des calculs effectués c'est pourquoi il est nécessaire de sommer les quantités de C (M.O. par le facteur 1.727) à « masse de terre équivalente » pour tenir compte des variations de cote liées aux changements de paramètres physiques de la parcelle (foisonnement, tassement). Ces calculs en « masse équivalente » nécessitent la connaissance des Da et de la part « d'inertes » dans le volume de terre concerné, données souvent absentes et alors considérées, peut-être à tort » comme invariantes.

IL faut aussi avoir conscience de la limite pas toujours évidente entre « sol » d'une part et « litière et débris figurés » d'autre part qui peut correspondre à des quantités considérable de carbone à attribuer à l'un ou l'autre compartiment.

La quantification des stocks de C à l'échelle de la parcelle et à fortiori à celle du « terroir » est donc un défi semé d'embuches, même si les protocoles sont de plus en plus codifiés (IPCC).

Diapo 8 : Cette diapositive illustre le rôle agronomique de la MO dans le cas des sols ferrugineux au Burkina Faso. La mise en correspondance de la teneur en C des 20 premiers cms et e la production en sorgho grains montre que, tous traitement confondus, on peut tracer une « courbe enveloppe » des productivités les plus fortes

pour un taux de C donné qui indique que la teneur en matière organique du sol ne limite plus la production du sorgho lorsque la valeur seuil de 5 mg C g-1 de sol est atteinte.

Une teneur convenable en C est donc une condition nécessaire mais non suffisante à une productivité correcte, celle-ci pouvant être affectée par d'autres facteurs (carence en P par exemple). Cette valeur seuil est compatible avec la valeur de durabilité du système définie par Feller en fonction de la teneur en éléments fins (A+Lf) du sol qui, dans ce cas précis, est de 6.8 mg C g-1.

Diapo 9 : Les techniques de fractionnement ont pour objectif d'apprécier la « qualité » de la MOS.

Nous n'aborderons pas les techniques chimiques historiques de fractionnement à la soude ou au pyrophosphate de Na même si de nouvelles méthodes de traitement de spectres UV lui donnent un regain d'intérêt.

Dans l'objectif de quantifier l'intégration des apports organiques au complexe organo minéral, nous avons utilisé une technique de fractionnement « physique » de la matière organique basée sur la dispersion des agrégats par l'énergie mécanique des billes de verre en présence d'hexamétaphosphate de sodium, sans destruction préalable de la matière organique du sol.

Cette technique, qui vise à obtenir des agrégats dont la répartition granulométrique est conforme à la granulométrie obtenue par la méthode classique d'analyse texturale , est basée sur une séparation de la terre fine dispersée par tamisage sous l'eau (jusqu'à 50 µm) puis, après dispersion par les ultrasons (étape délicate car la maîtrise de l'énergie des ultra-sons n'est pas aisée) et un dernier tamisage à 20 µm à un isolement des particules inférieures à 2µm par sédimentation, siphonage puis floculation.

Cette technique impose de nombreuses déterminations de C et N total sur les diverses fractions et demande un « savoir faire » certain. Elle devient d'application délicate pour des sols très argileux ou présentant beaucoup d'amorphes.

Diapo 10 : Les conclusion tirées de cette technique sous entendent qu'une association de la matière organique aux particules les plus fines est synonyme d'une plus grande stabilité comme le présentent les valeurs de turn-over des divers types de matière organiques et de la matière organique associée à des agrégats de diverses tailles, trouvées dans la littérature, turn over qui vont de quelques mois jusqu'au millénaire.

Souvent, dans un souci de simplification et d'économie, la séparation des agrégats est limitée à la fraction inférieure à 20 µm voire 50 µm (ce qui dispense du traitement aux ultrasons). Nous voyons ici un exemple de résultats obtenus par cette méthode appliquée à des terres au passé cultural différencié qui montre l'importance de la fraction inférieure à 50µm dans le stockage de la MO qui, sous culture sans apport de fumier résiste mieux à la chute globale du taux de MO du sol que l'ensemble de la MO puisqu'elle représente alors 69% de la MOS totale contre 51% sous savane et sous culture avec fumier). L'examen à la loupe binoculaire des fractions permet de « visualiser » la nature de la MO que l'on voit ici, dans la fraction > 200µm, surtout composée de débris figurés.

Diapo 11 : La détermination de l'azote total a subi la même évolution historique que celle du carbone total. La méthode Kjeldal de référence reste toutefois une valeur sure, si elle est convenablement mise en œuvre, c'est-à-dire en évitant les surchauffes ponctuelles, la prise en masse du gâteau de digestion et en poursuivant l'attaque pendant un temps suffisant que l'on juge à la couleur du résidu d'attaque,. La correspondance avec les résultats obtenus par les analyseurs automatiques

modernes est alors excellente et 95% de N organique est pris en compte sauf en cas de fortes teneurs en N nitrique qui peut être détruit au moins partiellement.
L'utilisation des appareils CHN répond aux mêmes exigences que pour le cas du carbone, avec, peut-être en plus, la nécessité de trouver des « étalons adaptés » aux gammes de teneur en N total des sols qui sont assez différentes de celles des matériaux pour lesquels ces appareils ont été conçus.
Diapo 12 : Après la détermination de N total qui permet de quantifier la quantité de N présente dans le sol, la détermination de N minéral (NH_4^+ et NO_3^-) est l'analyse de base des études concernant l'évolution de N organique dans les sols et de l'estimation de N disponible pour les plantes. La technique « traditionnelle » détaillée sur la diapositive permet de se rendre compte des nombreuses exigences, surtout logistiques, qu'elle impose.
Diapo 13 : Nous avons fait évoluer cette technique pour la rendre beaucoup moins lourde à mettre en œuvre et surtout permettre de s'affranchir de la chaîne du froid en assurant « en bordure de champ » l'extraction de N minéral et la conservation des extraits par l'utilisation de vénojects et d'une filtration stérilisante à 0.2µm. Ceci permet de transmettre au laboratoire d'analyse, qui peut se trouver très loin, des extraits « prêts à l'analyse », stables et d'une vingtaine de grammes environ dont la teneur en N ammoniacal et nitrique seront déterminées par colorimétrie automatique à flux continu.
Diapo 14 : L'azote minéral, nous l'avons déjà évoqué, ne représente que le « contenu d'un porte monnaie », contenu, par principe très fluctuant au grès des fuites (achats) et des réapprovisionnements à partir des réserves (retraits bancaires). L'évolution des stocks de N minéral (surtout de nitrates) est, à l'heure actuelle, surtout utilisée pour alerter sur les risques agronomiques (besoins en N de la plante puisqu'elle absorbe N essentiellement sous forme nitrique) et écologiques (fuites de nitrates). C'est à travers le couplage avec des simulations à l'aide de modèles de flux d'eau et de production de nitrates que ces valeurs sont utilisées pour confirmer ou non les hypothèses de minéralisation et de transfert prévues par la modélisation et donc permettent de s'interroger sur leur pertinence dans les conditions du terrain étudié.
Diapo 15 : Pour ajuster au mieux la fertilisation azotée, il est nécessaire de prédire la fourniture du sol en N par minéralisation de la MOS. Cette prévision fait appel aux déterminations de N minéral in situ. Raison, en imaginant de déterminer N minéral sur une aliquote de terre dont une partie est remise en place dans un tube couvert pour prévenir les fuites de nitrates, puis en déterminant N minéral accumulé dans le tube pendant une durée suffisamment réduite pour ne pas perturber le cycle naturel de minéralisation de N organique a mis au point une technique in situ permettant de vérifier, à posteriori cette minéralisation de N organique. Cette technique dont l'inconvénient consiste à « remanier » la terre avant réimplantation peut-être adaptée aux cas où les techniques culturales étudiées n'autorisent pas ce genre de remaniement, mais il se pose des problèmes d'échantillonnage qui résultent de la forte variabilité spatiale naturelle dans la minéralisation. Ce genre d'adaptation a été tenté lors d'études conduites récemment à Madagascar.
A côté de cette technique in-situ on met en œuvre, au laboratoire deux autres types de méthodes de mesure de la minéralisation de N organique à partir d'échantillons de terre seuls ou en interaction avec des produits divers.
Des techniques d'incubation pouvant aller jusqu'à plusieurs mois dans des conditions de température définies (en général 28°C dans notre cas) et d'humidité variables selon les cas mais assurant une incubation « aérobie » sans limitation des

conditions hydriques. Ces incubations sont souvent destinées à préciser les paramètres de la minéralisation pour des travaux de modélisation et sont généralement couplées aux mesures de décomposition par production du CO2.
Une technique d'incubation en conditions de submersion (Waring-Bremner) utilisée couramment au laboratoire dans sa variante « intensive » (40°C et incubation limitée à 7 jours), variante qui, en principe, limite la réorganisation à partir de N ammoniacal dont la variation de teneur est traduite en terme de vitesse de minéralisation (mg N kg-1 terre j-1).
Diapo 16 : Cette diapositive illustre la succession des opérations de détermination de N minéral sur le terrain. On y voit la phase d'extraction, où l'imagination n'est pas interdite pour faciliter le travail dans des conditions rustiques, l'éventuelle remise en place d'une aliquote de terre pour la mesure de N minéralisable in situ et enfin l'expédition vers le laboratoire d'analyse. Toutes ces techniques sont décrites en détail dans de notes spécifiques signalées en annexes.
Diapo 17 : Cette diapositive présente les résultats de détermination des vitesses de nitrification nette in situ dans les cas de parcelles en semi direct, travail du sol aux disques et sous labour profond sur un oxisol brésilien. En dépit d'une assez forte variabilité, on remarque une vitesse de nitrification plus élevée en cas de semis direct sous couverture de *Bracharia* que l'on pourrait attribuer à une population nitrifiante plus "efficace" en semis direct, à la présence de résidus facilement nitrifiables en plus forte quantité que pour les deux autres traitements… mais aussi à un artefact du à l'aération du sol à la remise en place dans les tubes.
Diapo 18 : Comme cela a déjà été évoqué, la méthode de Waring Bremner est une technique « rapide » de screening sur le critère de la capacité minéralisatrice de N organique. Cette technique, malgré son artificialisation importante, donne des résultats en bonne relation avec la mesure in situ de cette même capacité à l'échelle d'un cycle cultural (graphe). L'évolution de la technique depuis sa publication en 1964 correspond à une simplification et à une plus grande capacité d'utilisation pour un grand nombre d'échantillons.
En plus d'une gestion facilitée, le choix d'une technique en submersion totale est justifié car l'immobilisation de N est plus faible en anaérobiose qu'en aérobiose et la température de 40°C en 7 jours préconisée par Kandeler l'est car, en anaérobiose, elle limite l'inhibition partielle des protéases. Il faut signaler que les nitrates présents en début d'incubation sont au moins partiellement dénitrifiés en N_2 au cours de l'incubation et la minéralisation est calculée à partir de la seule la variation de NH_4^+.
Diapo 19 : La quantification de N minéralisable, par les techniques de Raison ou Waring-Bremner sont aussi en accord avec la mesure directe de N prélevé par des plantes comme le montrent les études conduites au Cameroun et au Burkina Faso dans le cas de sols ferrugineux.
Diapo 20 : Des techniques chimiques de fractionnement et d'extraction sélective sont aussi utilisées pour quantifier la part de N organique du sol susceptible de contribuer à la nutrition de plantes. Elles n'ont réellement un intérêt que si la corrélation obtenue avec N prélevé par la plante est bien plus étroite qu'avec N total. On notera que cette corrélation est souvent améliorée si on ajoute à N minéral la part organique des extraits KCl qui peut, sur des ferralsols, par exemple, être du même ordre de grandeur que N nitrique. D'autres techniques telles que N extrait par le permanganate de potassium en milieu acide sont signalées dans la littérature.
La méthode la plus utilisée reste l'hydrolyse des protéines par HCl6N à reflux pendant 16 heures, où une variante actuelle basée sur l'hydrolyse en « bombes en téflon », et la distillation sélective de l'hydrolysat en présence de soude (Nhd) puis

après minéralisation Kjeldhal d'une aliquote de cet hydrolysat (Nhnd). L'analyse étant complétée par la détermination on de N total du résidu d'hydrolyse, directement ou par calcul, selon la succession des opérations schématisée sur le diagramme. Le rapport des fractions N hydrolysable distillable et non distillable ainsi que la part non hydrolysable sont des indicateurs parfois utiles de la disponibilité de N organique du sol.

Diapo 21 : Après avoir caractérisé la MO du sol nous nous intéresserons aux techniques de caractérisation de la « qualité » des entrées organiques. La détermination des teneurs en C et N totaux relevant de techniques similaires à celles déjà décrites pour la MOS, cela recouvre essentiellement 2 critères : la composition pariétale selon la technique de Van Soest et la détermination de la teneur en polyphénols solubles selon Folin et Ciolcateu, techniques qui ont pour objectif de définir des indicateurs de « biodégradabilité intrinsèque » des entrées organiques.
Le rôle de la fixation biologique de N_2 ne sera pas abordé au cours de cet exposé car c'est, en soi, un vaste thème de recherche et d'optimisation du système de culture.
Nous évoquerons aussi une étude particulière liée à la phytotoxicité des litières de Filao (*Casuarina equisitifolia*), ne serait-ce que pour souligner qu'entrée organique n'est pas forcément synonyme de « plus » pour la plante.
A l'heure actuelle, les teneurs en C, N, la composition pariétale et la teneur en polyphénols solubles totaux peuvent être déduites de l'exploitation des spectres dans le proche Infra rouge (NIRS ou SPIR) à condition d'avoir établi les bases d'étalonnage nécessaires. Cette méthode ouvre de très larges perspectives pour des suivis rapides et à grande échelle, Laurent Thuries y consacrera un exposé spécifique.

Diapo 22 : A l'heure actuelle, les teneurs en C, N, la composition pariétale et la teneur en polyphénols solubles totaux peuvent être déduites de l'exploitation des spectres dans le proche Infra rouge (NIRS ou SPIR) à condition d'avoir établi les bases d'étalonnage nécessaires. Cette méthode ouvre de très larges perspectives pour des suivis rapides et à grande échelle, Laurent Thuries y consacrera un exposé spécifique.
Cette technique a été développée, à l'origine, pour caractériser la digestibilité des fourrages. Elle est basée sur des digestions successives par des réactifs d'agressivité croissante dans des conditions précises d'application : d'abord un réactif neutre à 100°C pendant 1 heure ou ND puis à base acide modérée (à base 1N H_2SO_4 environ) à 100°C pendant 1 heure ou AC et enfin un réactif très acide (à base 28N H_2SO_4) pendant 3 heures. Après chaque action du réactif, le produit restant qui a été placé dans des creusets filtrants, est lavé à l'eau bouillante puis à l'acétone et pesé après séchage à 40°C. Une des 4 répétitions, au moins, mise en place est sacrifiée et l'humidité résiduelle entre 40 et 105°C et la teneur en cendres est déterminée à chaque étape pour en tenir compte dans le calcul de la part organique dissoute par chacun des réactifs.
L'ensemble de ces opérations est symbolisé par le diagramme de la diapositive. La part de produit solubilisée par le réactif AD..S (ADS) est un « équivalent hémi celluloses », celle solubilisée ensuite par le réactif AD..C est un « équivalent cellulose et la part résistant à cette dernière attaque un « équivalent lignine ».
Cette technique, faisant appel à des pesées résiduelles après filtration ne peut être appliquée qu'à des produits solides non colmatants et son application dans notre domaine d'étude est parfois limite. Par contre, comme elle est aussi très utilisée en agro alimentaire, elle a fait l'objet d'améliorations technologiques (filtration semi

automatisée, attaque en réacteur fermé dans des sacs semi perméables) qui rendent son application plus facile.
Le calcul des résultats finaux et la vérification de la qualité des analyses étant assez délicats pour un « non initié », une feuille de calcul Excel spécifique dont vous avez un aperçu sur la diapo suivante a été développée.
Diapo 23 : Cette feuille est divisée en 3 parties :
La première sert à noter l'ensemble des pesées nécessaires pour le traitement des échantillons,
Les deux autres, remplies automatiquement au fur et à mesure du remplissage de la première fournissent d'abord une vérification de la qualité du travail en donnant des résultats individuels finalisés de pesée et enfin les résultats finaux du calcul par rapport au produit brut et à sa part organique.
Diapo 24 : Cette diapositive présente l'évolution de la composition pariétale d'une litière de filao sur 2 sites (DG et Ka) différents par l'âge des plantations qu'ils supportent.
Si la composition pariétale des feuilles, qui paraissent relativement riches en lignine, est curieuse par rapport à celle des litières qui contiennent aussi des fruits, on remarque que les litières sont caractérisées, dans les deux cas, par des teneurs de plus en plus forte en « lignine » de la couche la plus superficielle, donc récente (1), jusqu'à la couche la plus profonde, donc ancienne (3).
Diapo 25 : Les polyphénols solubles totaux sont le second indicateur de résistance des MO à la dégradation dans les sols. La technique d'extraction, résumée sur la diapositive, est suivie d'une détermination à l'aide du réactif de Folin-Ciolcateu. Cette réaction colorimétrique est le fait d'une gamme assez large de produits et les résultats sont exprimés en « équivalents acide tartrique » qui est utilisé pour la gamme étalon. Un rapport (Lignine + Polyphénols totaux)/ Ntotal supérieur à 8 indique une résistance à la biodégradabilité de la MO.
Sur un nombre relativement important de résidus végétaux analysés au laboratoire, seul un nombre réduit contenait des teneurs significatives en polyphénols totaux.
Diapo 26 : De simples tests de germination peuvent être utilisés pour vérifier l'innocuité des matières organiques susceptibles d'être récupérées pour des usages agricoles. La phytotoxicité des litières de filao les plus «récentes » (couche superficielle ou couche 1) est mise en évidence par un test de germination de graines de cresson mises à germer à 28°C en mélange avec la terre sur laquelle elle a vocation a être épandue. Cette phytotoxicité diminue puis s'annule pour la couche la plus profonde (4).
Diapo 27 : Par un test de germination des graines de laitue sur des papiers filtres imbibés d'extrait aqueux (1/10) de litière diluée de 1 à 640 fois, on peut, par analogie avec les indices utilisés pour la détermination de la toxicité des produits chimiques, déterminer graphiquement le rapport de dilution des litières, qui permet la germination de 50% des graines (indice « GI » de valeur 0.50). Ceci permet de quantifier par une seule valeur la phytotoxicité.
Diapo 28 : L'expression des résultats obtenus par rapport à la [C soluble] dans les extraits sur lesquels les graines sont mises à germer met bien en évidence, toutes situations confondues, l'existence d'une zone de manifestation de la phytotoxicité des extraits aqueux de litière qui se manifeste pour des [C soluble] > 100 mg l-1 environ.
Diapo 29 : La spectrométrie dans le proche infra rouge peut être utilisée pour prédire le taux de Carbone total des litières de Filao mais aussi pour prédire leur phytotoxicité, démontrant par là le large domaine d'application de cette technique.

Diapo 30 : L'incorporation au sol des litières, naturelles comme sous forêt ou plantation arborée par exemple, ou issues de la gestion du système de culture comme dans le cas de la gestion des systèmes avec plantes de couverture en semis direct, est la première étape de l'incorporation de leur matière organique dans le sol.
Diapo 31 : L'approvisionnement à partir des retombées des arbres est mesuré à l'aide de « collecteurs de litières, simples toiles tendues sous l'arbre et dont la géométrie doit être adaptée pour être représentative d'une « surface élémentaire de collecte ». Les collecteurs sont relevés régulièrement.
L'intégration au sol de la litière peut être conduite à l'aide de « litterbags », sacs en toile si possible acier inox où l'on enferme une aliquote des produits dont on veut étudier la décomposition et dont la taille des mailles est choisie selon les effets que l'on souhaite mettre en évidence, 3 à 5 mm pour une étude globale ou 0.2 mm pour l'étude du seul effet de la microflore. Ces « sacs » peuvent être enfouis ou disposés à la surface du sol selon les cas.
Un autre type de dispositif est constitué par des « cages d'exclusion », qui peuvent être de fabrication artisanale.
Diapo 32 : Les « cages d'exclusions » respectent au mieux l'évolution naturelle de l'incorportation d'un mulch au sol, mais la difficulté consiste à déterminer la quantité de matière présente dans la zone d'exclusion au moment de la mise en place du dispositif.
Les litterbags, présentent l'inconvénient de modifier assez fortement les conditions naturelles par le tronçonnage des résidus et la modification des conditions d'humidité, particulièrement pour ceux à très petites mailles.
La pesée initiale et finale du contenu des cages ou des litterbags doit être complétée par la détermination des teneurs en C et N total et cendres totales pour pouvoir quantifier réellement l'incorporation au sol des litières.
Diapo 33 : Cette diapositive présente l'application qui a été faite en centre Côte d'Ivoire de l'utilisation des litterbags pour l'étude de l'incorporation de couvertures de *Chromoleana* et de *Pueraria* dans le cas de systèmes en semis direct sous maïs. On y présente l'effet spécifique de la macrofaune par comparaison des quantités de C organique restant dans des litterbags de maille ,3 mm et 200 µm ainsi que la dynamique de décomposition de la litière qui peut être ajustée à une somme de deux exponentielles décroissantes avec, à terme, disparition totale des résidus.
Diapo 34 : Après avoir caractérisé la MOS ainsi que les matières organiques exogènes et leur accès au « compartiment sol », nous allons nous intéresser au processus des minéralisation de ces divers compartiments dans le sol c'est-à-dire à la résultante de deux fonctions la minéralisation brute d'une part et l'organisation brute d'autre part qui, en conditions aérobies libère du CO_2 et alimente le compartiment « ammonium », ensuite repris par des bactéries spécifiques pour aboutir aux nitrates. L'acteur principal de ces transformations est la « biomasse microbienne », compartiment fluctuant mais à l'activité essentielle.
Diapo 35 : Etudier la dynamique de décomposition des matières organiques revient donc sur le terrain à :
suivre des évolutions de C et N total et éventuellement l'intégration de matières organiques exogènes dans certaines fractions granulométriques,
Vérifier l'importance des modifications de l'activité microbiennes et de biodégradation des matières organiques exogènes par la mesure des flux de CO_2 à l'interface sol-atmosphère par la mise en place de cloches ou de tunnels de confinement.
La multitude des facteurs de fluctuation de ces flux, conduit, pour prédire des évolutions à long terme et/ou s'affranchir d'une multitude d'expérimentations

ponctuelles, à concevoir des modèles d'évolution de la minéralisation de la matière organique, intégrant l'effet des facteurs environnementaux (climatiques et biophysiques) et de la « qualité » des matières organiques. Les paramètres relatifs à ces modèles sont généralement acquis à l'aide d'expériences en laboratoire et leur validité est vérifiée par confrontation des données modélisées avec celles acquises à partir de mesures sur le terrain.

Diapo 36 : Nous avons passé en revue les techniques de détermination de C et N total et de « fractionnement » physique et chimique de la MO pour C et N. Il reste donc à exposer la détermination de la cinétique de production de CO_2. S'agissant d'un gaz elle passe par :

- son accumulation dans une enceinte fermée, ou semi-fermée dont on peut mesurer le débit de circulation de l'atmosphère,
- le piégeage par une base du CO_2 accumulé dans cette enceinte suivi du dosage de la quantité de base en excès selon les principes de chimie classique exposés sur la diapositive ou le dosage direct de la [CO_2] de l'atmosphère à l'aide d'appareils dédiés (mesure Infra rouge ou Catharomètre).

La première solution présente l'avantage de la rusticité mais demande une logistique « laboratoire » assez importante dés que le nombre d'objets suivis est important et une bonne technicité des manipulateurs tandis que la seconde solution se heurte à des investissements non négligeables, au problème des fuites lors du confinement de l'enceinte et à la mesure du volume de l'enceinte de mesure. Elle présente l'avantage de ne pas réduire le seul suivi à celui du CO_2 mais aussi d'être utilisable pour le suivi de la dénitrification et de la volatilisation dont nous parlerons plus tard.

Diapo 37 : Cette diapositive présente une enceinte de confinement en place au Brésil, pour la mesure du CO_2. Ces enceintes sont composes d'une « base » présente à demeure sur le terrain et d'une cloche mise en place pour la durée de la mesure. On voit ici, sur la base, la réalisation, en cours, d'un prélèvement de gaz du sol, effectué dans le cadre de cette étude. La cloche est munie d'un ou deux ajutages pour le prélèvement de son atmosphère, d'un dispositif de brassage de l'air et de sondes pour la mesure de la température. Sur la photo, l'enceinte est connectée à un appareil à Infra rouge Licor pour la mesure de la teneur en CO_2.

Diapo 38 : Cette diapositive illustre les résultats que l'on obtient par mesure directe des flux de CO_2 à l'aide de cloches fermées sur le terrain où l'on a mis en évidence l'effet de certaines techniques culturales telles le labour qui multiplie par 3 le flux de CO_2 1 heure après labour. On peut aussi mettre en évidence un rythme circadien de l'émission de CO_2 au niveau du sol qui, dans les Cerrados brésiliens, double entre 8 heures et 11 du matin alors que la température augmente de 5°C puis diminue de 30% entre le début de l'après midi et 21 heures avec une chute concomitante de température de 15°C le jour de l'expérience.

Diapo 39 : Ce dispositif figure une enceinte fermée lors d'une incubation au laboratoire avec, à l'intérieur, un cristallisoir contenant l'échantillon en cours d'incubation surmonté d'un flacon pouvant être fermé hermétiquement dés sa sortie de l'enceinte et contenant la solution basique de piégeage du CO_2.

Diapo 40 : Cette diapositive montre une évolution du dispositif précédent avec la présence de 2 ajutages pouvant être bouchés hermétiquement et connectés à un chromatographe en phase gazeuse avec circulation en circuit fermé de l'atmosphère du flacon d'incubation pour la détermination de la teneur en CO2 et éventuellement en N2O de cette atmosphère.

Diapo 41 : On détermine donc, par piégeages successifs, ou confinement puis flushing après analyse de l'atmosphère des flacons, la vitesse de minéralisation (par son métabolite final, le CO_2) de la MO du sol ou du mélange MO du sol et MO exogène.
Deux options sont alors possibles pour « formaliser » sous forme de cinétiques ou de combinaisons de cinétiques, généralement du premier ordre, la minéralisation du sol seul, du sol en mélange avec une MO exogène et/ou de la MO exogène seule :
 ajuster les courbes de vitesses elles mêmes puis intégrer ces courbes, la constante à l'origine étant nulle, pour obtenir des valeurs cumulées et visualiser ainsi la part « biodégradable » comme il est illustré sur la diapositive ;
 sommer les quantités cumulées mesurées par période de confinement et ajuster les cinétiques de minéralisation à partir des valeurs cumulées.
La minéralisation propre d'une MO exogène pourra :
(i) être formalisée à partir de la différence des valeurs moyennes homologues des traitements avec et sans incorporation ;
(ii) résulter de la différence des courbes formalisées au préalable (tirets mauves).
Diapo 42 : Dans certains cas, comme par exemple des effluents agro industriels contenant une part importante de MO très facilement biodégradable, les premières heures suivant le mélange de la MO avec la terre sont essentielles dans la formalisation des quantités finales de la part minéralisable de MO exogènes et des fonctions en S du type « logistique » sont mieux adaptées à la formalisation de la minéralisation que des fonctions du type « cinétique du premier ordre » qui, par construction, impliquent une vitesse maximale à t = 0 alors que le temps de mise en place d'une biomasse zymogène adaptée plaide plutôt pour un retard dans l'établissement de la vitesse maximale de minéralisation.
D'autres types d'artefacts sont aussi à prendre en compte dans la formalisation de la minéralisation, par exemple le piégeage du CO_2 minéralisé par la chaux lorsque celle-ci a été utilisée en excès pour neutraliser ou « stériliser » certains effluents à épandre.
Diapo 43 : Les dispositifs d'incubation peuvent être adaptés pour mesurer parallèlement la minéralisation de la MO par le suivi du CO_2 dégagé, la dynamique de N par un suivi de N minéral. Ce dernier suivi étant « destructif » contrairement à celui du CO_2, il sera nécessaire de prévoir un nombre suffisant de « microcosmes » pour pouvoir assurer le suivi. Il faudra aussi choisir entre différentes techniques de gestion de ces microcosmes, ce qui n'est pas sans conséquences sur le traitement statistique des données de l'expérience. Ce suivi de N peut mettre en évidence des immobilisations nettes temporaires de N apporté, selon les types de MO exogènes testés.
Diapo 44 : Les mesures ponctuelles réalisées sur le terrain et les paramètres de décomposition acquis lors d'expériences de laboratoire n'ont d'utilité générale que s'ils sont confrontés à des simulations effectuées à l'aide de modèles. Ces modèles sont, pour la plupart dérivés historiquement du modèle de Hénin-Dupuy qui fait l'hypothèse que la MO du sol se décompose suivant une cinétique du premier ordre (la vitesse de décomposition est proportionnelle à la quantité de substrat restant à décomposer – constante K_2) et qu'une MO exogène alimente la MOS suivant un processus de même nature (constante K1), chacune des deux cinétiques aboutissant, in fine, à la libération de CO_2.
En faisant des hypothèses, ou des mesures parallèles sur la quantité initiale (H0) et la vitesse de décomposition de compartiments difficilement individualisables tels que

les racines, on peut en déduire, si on dispose de séquences suffisamment longues de données, les valeurs de K_1 et K_2.
Diapo 45 : Ceci a par exemple été fait lors d'une expérimentation conduite au Burkina à partir des données de l'essai « longue durée » de Saria, où la valeur de K1 calculée pour un « fumier de parc » et celle de K_2 pour sont replacées par rapport à la littérature avec lesquelles elles concordent convenablement.
Diapo 46: Depuis Hénin-Dupuy, les modèles ont évolué en distinguant, à l'intérieur de la MOS et des MO exogènes des « compartiments indépendants » soumis à des cinétiques de décomposition du premier ordre différenciées par la valeur de la constante de décomposition, ces valeurs étant pondérées par des « fonctions d'atténuation » dépendant des conditions climatiques (température et humidité en réalité la pluviométrie) et du système de culture, en particulier un facteur « couverture du sol ».
Dans ce type de modélisation (dans ce cas Roth-C), l'écueil réside dans la qualité du jeu de données disponible et notamment la connaissance des « conditions initiales » qui ne sont pas toujours disponibles et remplacées par des valeurs « sous jachère permanente » acquises « à proximité ».
Diapo 47: L'application du modèle Roth-C à l'essai de longue durée de Saria au Burkina Faso permet une bonne simulation de l'évolution du taux de MO dans le cas des traitement sans apports de MO mais surestime très nettement cette évolution en cas de très fort apport de fumier (40 t ha-1), a tel point que, pour retrouver une simulation en accord avec les valeurs mesurées il faut supposer que les apports ont été, en réalité, du tiers de ceux mentionnés.
Cette application démontre toutefois qu'un maintien du taux de MO n'est possible qu'au prix d'apports de doses importantes de fumier, peu compatibles avec la réalité de celles disponibles dans la zone.
Diapo 48: Les dernières générations de modèles tels Cantis (Carbon and Nitrogen Transformations In Soil) couplent la dynamique de C et celle de N en orientant la dynamique de N vers l'immobilisation ou la minéralisation en fonction de l'évolution du rapport C/N et en distinguant des compartiments de biomasse microbienne natifs et développés consécutivement à l'apport des MO exogènes (zymogène). Dans ce modèle aussi, les constantes de décomposition sont pondérées en fonction des conditions de milieu mais aussi des conditions physico-chimiques (contact sol – produit ou niveau de N minéral).
De tels modèles, qui tiennent en plus compte de la « qualité » des apports organiques, décrivent au mieux leur décomposition sauf pour quelques cas particuliers tels les apports de produits avec de fortes proportions de C très facilement décomposable, comme certains effluents agro-industriels, pour lesquels les premières journées suivant l'incorporation au sol sont très importantes.
Diapo 49: Comme cela a déjà été signalé, c'est la biomasse microbienne qui se trouve au carrefour de toutes les transformations que nous venons d'évoquer. Nous allons maintenant nous intéresser à sa quantification.
Diapo 50: Les techniques de caractérisation de la biomasse microbienne sont nombreuses et, comme toujours lorsqu'un grand nombre de techniques coexistent c'est qu'aucune n'est parfaite. Ces techniques peuvent être divisées en 2 groupes :
Les techniques de dénombrement mais, les populations microbiennes étant de plusieurs millions d'individus par cc de sol, et les techniques de coloration délicates et non ubiquistes, les comptages directs s'avèrent très délicats. Les dénombrements par culture microbienne sur boites de Pétri sont sélectifs de certains groupes bactériens et non exhaustifs.

On préfère donc à ces techniques des méthodes indirectes de quantification, par dosage de composés spécifiques de certaines populations par exemple ou mesure globale de certaines activités enzymatiques mais là aussi il s'agit de techniques réservées a des laboratoires spécialisés.
Les techniques les plus courantes sont les techniques de fumigation (généralement le chloroforme pour lyser les bactéries suivies soit d'extraction et dosage de composants (C, N, P ou N alpha aminé) extraits par référence à un échantillon non fumigé, soit par mesure de la respiration supplémentaire induite par le substrat que constituent les bactéries lysées.
Diapo 51: Au laboratoire, nous utilisons la méthode de fumigation extraction suivie du dosage de N alpha aminé (N des protéines) dans l'extrait, relativement à un échantillon extrait sans fumigation, cette technique qui doit être bien sur appliquée sur un sol frais, présente l'avantage que la partie « fumigation –extraction » peut être réalisée par un laboratoire rustique, proche du terrain et être couplée (extrait non fumigé) à la détermination de N minéral. Le dosage colorimétrique par la ninhydrine de N alpha aminé peut, lui, être ensuite différé si les échantillons sont conservés dans les conditions préconisées dans la note technique spécifique.
Diapo 52: En fait, la biomasse microbienne étant une caractéristique très fluctuante en fonction des conditions du moment, il est difficile d'en tirer des informations directement sinon, avoir une information importante sur la part de C qu'elle représente dans le C total, valeur qui est utilisée, souvent par défaut à 2% environ, dans les modélisations. On peut voir tout de même qu'il existe, dans certains cas une relation de proportionnalité entre biomasse microbienne et N minéralisable par exemple.
Diapo 53: Nous avons passé en revue les diverses séquences du cycle de la matière organique et évoqué, même imparfaitement, la quantification des divers compartiments aussi bien pour C que pour N. Nous allons maintenant nous intéresser aux puits de N dans ce cycle de l'azote dans le sol. Nous ne parlerons pas de celui qui est agronomiquement le plus intéressant c'est-à-dire le prélèvement de N par la plante, puisqu'il s'agit d'une problématique plutôt liée à la plante et moins à la science du sol. Nous signalerons simplement que la demande en N de la plante est affaire de satisfaction de ses besoins quotidiens qui sont très évolutifs au cours du cycle cultural et donc que le volume de sol exploré par les racines devra toujours être en demeure de parvenir à ces besoins.
Pendant très longtemps, pour satisfaire cette exigence, il a suffi de surdimentionner l'offre par une fertilisation azotée pléthorique. Les conséquences en sont maintenant une fuite importante de nitrates par lixiviation (entrainement en profondeur de l'ion en solution) auquel nous allons nous intéresser.
Diapo 54: Déterminer les pertes par lixiviation c'est coupler une mesure de flux d'eau avec la connaissance de la teneur en N nitrique de ce flux.
Pendant 20 ans le suivi hydrique par humidimétrie neutronique a été la technique de choix pour ce faire (à condition de pouvoir implanter convenablement les tubes de suivi, de disposer d'un étalonnage correct de la sonde et de pouvoir réaliser les mesures jusqu'au plan de flux nul). A l'heure actuelle, par suite des restrictions liées au transport des appareils à source radioactive, la mesure des profils hydriques est plus délicate (implantation de sondes TDR et tensiomètres) mais les modèles de transfert hydrique sont sophistiqués et cet aspect est maitrisé si on dispose des jeux de données adéquats (profils d'humidité volumique et profils tensiométriques).
Plusieurs types de dispositifs sont utilisables pour déterminer la [$N\text{-}NO_3^-$] à une côte donnée :

les bougies poreuses – dispositifs à succion qui collectent la phase liquide libre à la tension imposée dans la bougie entourant son point d'implantation. Le liquide contenu dans la bougie après 12 à 48 heures de mise en dépression est collecté et analysé les tensionics, dont on voit sur la diapositive la mise en place, et qui eux, fonctionnent sur un échange entre la phase liquide interne de la bougie (à l'origine de l'eau distillée) et la phase liquide externe. Cet échange doit durer une dizaine de jours pour qu'il y ait équilibrage, temps au bout duquel le liquide est collecté, la bougie vidée par aspiration puis à nouveau remplie d'eau distillée. Ces systèmes sont aussi utilisés comme tensiomètres. Ils sont commercialisés par la société SDEC et utilisés pour le suivi de la qualité de l'eau de certains bassins d'eau minérale (Perrier, Volvic).
Leur utilisation n'est pas exempte d'aléas par colmatage des parois ou décrochage par rupture de la continuité capillaire entre l'intérieur et l'extérieur de la bougie. Il faut aussi signaler que les parois de la bougie ne sont pas chimiquement inertes par exemple vis-à-vis des phosphates.
Diapo 55: Les dispositifs de collecte de la solution du sol par les bougies poreuses, ou des plaques disposées à diverses profondeurs à partir des parois d'une fosse (lysimètres sans parois) peuvent aussi être utilisés pour collecter la phase liquide circulante dans le sol (solution du sol). Ces dispositifs qui sont parfois semi automatisés (avec mise en dépression automatique et collecte d'aliquotes par des pompes sont les successeurs de lysimètres à parois utilisés dans le passé et à qui on faisait le reproche d''être des systèmes à piston. Ce type de lysimètres sont très intrusifs pour les parcelles et donc ne peuvent être installés que dans des cas particuliers. L'estimation des quantités lixiviées est faite à partir des volumes d'eau collectées et de leur teneur en nitrates. Les flux d'eau ainsi collectés sont mis en relation ave ceux obtenus par le suivi hydrique et tensiométrique.
Diapo 56: Cette diapositive illustre des suivis de N, mais aussi de cations (Ca^{++}) en l'occurrence à l'aide de tensionics à 1m50 de profondeur. La comparaison des techniques culturales étudiées montre, qu'en interculture (mai à juin) les parcelles en semis direct avec couverture présentent des teneurs en N minéral moins forte. Dans tous les cas, la dynamique des teneurs en N minéral est relativement régulière et les maxima correspondent au plus fort de la saison des pluies.
Diapo 57: Pour estimer les quantités lixiviées on associe à chaque mesure de [él] un flux d'eau, calculé par modélisation et couvrant la période centrée sur la date de mesure de teneur. La sommation des valeurs calculées pour chaque mesure est une estimation de la quantité de N ayant transité à la cote de mesure. Ici elle permet de distinguer l'effet des techniques culturales.
Diapo 58: Après la lixiviation des nitrates nous allons nous intéresser aux fuites par voie gazeuse qui sont de deux types :
la volatilisation de N ammoniacal qui n'intervient que lorsqu'il y a conjonction de présence de NH_4^+ et un pH alcalin
la dénitrification qui elle, accompagne le processus de nitrification et est favorisée par des conditions réductrices et qui peut être complète, c'est-à-dire aboutir à la formation de N_2 et est,dans ce cas, seulement économiquement préjudiciable, ou incomplète c'est-à-dire aboutir à la formation de N_2O qui est un gaz à effet de serre 300 fois plus efficace que le CO_2.
Diapo 59: Ce diagramme résume les divers facteurs pouvant intervenir sur l'intensité des pertes par volatilisation.
L'urée apportée et hydrolysée par l'uréase libère dans le milieu de l'ammoniac en équilibre dans la phase liquide entre la forme ionisée et la forme gazeuse qui diffuse

d'autant plus dans l'atmosphère que la température est élevée et que le vent éloigne l'ammoniac en phase vapeur de l'interface avec la phase liquide et est alors libéré dans l'atmosphère.
L'ammoniac sous forme ionisée aura tendance à s'adsorber sur le complexe adsorbant du sol dont les déterminants sont classiquement la texture et la matière organique.
NH_3 en phase aqueuse peut aussi échapper à la transformation en phase gazeuse lorsqu'il est entraîné ou positionné en profondeur (enfouissement) ou qu'il est utilisé comme substrat pour la nitrification.
Diapo 60: la mesure de la volatilisation fait appel à des techniques qui impliquent généralement le piégeage de NH_3 sous forme de $(NH_4)_2 SO_4$ à l'aide d'une solution de H_2SO_4 ou de filtres en fibre de verre imbibés de H_2SO_4.
En milieu totalement ouvert et sur des parcelles de taille suffisante (de l'ordre de l'hectare au moins) pour s'assurer de la représentativité des mesures, on peut disposer des pièges à diverses hauteurs depuis le niveau du sol jusqu'à une dizaine de mètres pour déterminer la teneur volumique de l'atmosphère en NH_3. Le gradient de teneurs et des modèles micro météo de circulation de l'atmosphère sont utilisés pour quantifier les pertes au niveau de la parcelle,
Toujours sur le terrain des tunnels couvrant une surface limitée peuvent être utilisés aux mêmes fins. Une aliquote du flux de ventilation des tunnels sera piégée pour en déduire le flux de volatilisation,
Enfin, on peut disposer sur le terrain des pièges fermés, couvrant une surface réduite, généralement sur la base de systèmes mettant en jeu une base fixe et une cloche amovible pendant une durée limitée à quelques heures au plus pour éviter une trop forte dégradation des conditions climatiques sous la cloche.
En milieu fermé on peut disposer des pièges à circulation par barbotage dans une solution acide ou de pièges statiques à base de papier en fibre de verre imbibé de H2SO4. Ces divers systèmes doivent être testés au préalable pour s'assure de leur efficacité.
Diapo 61 : Cette diapositive présente de tels dispositifs de piégeage utilisés au laboratoire. Comme on peut le voir ce sont des dispositifs très simples. Les microcosmes d'incubation surmontés du filtre « piège » sont placés dans des enceintes fermées pendant la durée de piégeage, enceintes sur lesquelles on détermine aussi les accumulations de CO_2 et N_2O.
Après récupération du filtre, il est placé dans un volume connu de solution 1M de KCl et NH4+ ayant diffusé dans la solution est déterminé par colorimétrie automatique.
Diapo 62 : Les résultats obtenus en laboratoire à l'aide de ce genre de dispositifs sont illustrés ici par la mise en évidence du rôle de la teneur en argile du sol sur la volatilisation après un apport d'urée.
Diapo 63 : Ce genre de dispositif a aussi été utilisé pour étudier la volatilisation à partir de matières organiques (Guano et Farines de plumes dans ce cas) incorporées au sol et montrer ainsi que, sur sol sableux (Teza) les quantités de N volatilisées peuvent représenter une part importante de N apporté alors qu'elles sont négligeables sur sol argileux (Lamentin).
Diapo 64 : Nous allons maintenant nous intéresser aux pertes de N par dénitrification. Ces pertes sont agronomiquement faibles (au plus quelques pour cent des apports azotés) mais ont pris une grande importance depuis la sensibilisation de leur rôle en terme de gaz à effet de serre. Ajoutons aussi que, lorsqu'elle est pilotée jusqu'à son terme, la production de N_2, la dénitrification peut être utilisée pour diminuer la teneur en azote de certains effluents.

La dénitrification peut avoir lieu à 2 étapes de la biosynthèse des nitrates :
Lors de la nitritation, en conditions semi aérobie. Ceci peut être mis en évidence en bloquant la nitritation par l'acétylène à une pression partielle de 10 pascal
A partir des nitrates lors qu'on se trouve en conditions d'anaérobiose. Elle est alors le fait de bactéries anaérobies facultatives et comporte deux phases, la première conduisant après une phase transitoire de production de NO, à la production de N_2O et la seconde assurant la transformation N_2O □ N_2. Cette étape peut être bloquée en présence d'une pression partielle de 2.5 à 10 Kpascal.
Davidson à résumé les conditions de la dénitrification en fonction du taux de remplissage des pores en eau (en anglais WFPS pour Water Filled Pore Space) sur le graphe présenté dans la diapositive
On y voit la succession des mécanismes en fonction du WFPS et on voit que les divers métabolites finaux : NO, N_2O et N_2 ont un optimum puis décroissent. La dénitrification n'est conduite jusqu'à son terme N_2 que lorsque le WFPS devient > 0.80.
Diapo 65 : Pour quantifier la dénitrification un modèle est plus particulièrement utilisé : NOE (Nitrous Oxyde Emission). Il subdivise les émissions de N_2O en 2 entités aux formalismes distincts et qui évoluent en fonction du WFPS comme indiqué sur le diagramme.
Les émissions liées à la nitrification sont fonctions du taux de nitrification de N ammoniacal, de la teneur en eau du sol et de la température. Entre les valeurs de WFPS comprises entre 0.62 et 0.80, elle fait appel au taux de conversion de N_2O en N_2, conversion qui est ensuite considérée comme complète si WFPS est supérieur à 0.80.
L'expression des facteurs de température et de taux de nitrification sont de fonctions assez complexes dont les paramètres sont acquis en laboratoire.
Diapo 66 : La seconde entité, N_2O produit par dénitrification, exprime que la vitesse de dénitrification effective est fonction d'une valeur potentille pondérée par un facteur dépendant de la teneur en nitrates, de la valeur de WFPS, de la température par une loi de type Q10 et la valeur limite de conversion du N_2O en N_2 lors du processus.
Diapo 67: Pour doser N_2O il faut faire appel aux techniques de chromatographie en phase gazeuse (CPG). Selon le niveau de sensibilité exigé pour l'expérience on peut utiliser un système de détection par micro catharomètre avec une limite de détection qui sera au mieux de l'ordre de la partie par millions, ou un système de détection par capture d'électrons qui utilise une source radioactive de 63Ni et qui, en gaz vecteur argon-méthane permet d'abaisser la limite de détection à 0.1 voire 0.05 partie par millions. Le suivi de valeurs en conditions de teneurs naturelles (0.3 vpm) exige ce type de détection.
Le détail du mode opératoire dépend ensuite du niveau de sophistication donc du prix du matériel disponible et tout particulièrement de l'existence d'une boucle d'injection et/ou un passeur d'échantillons, sachant qu'avec un CPG à ECD le temps d'acquisition d'un chromatogramme est de 4 minutes environ.
Diapo 68: Cette diapositive illustre le type de matériel disponible dans notre laboratoire pour ces analyses.
Pour conserver les échantillons prélevés sur le terrain, il est indispensable d'utiliser si possible des tubes Labco-exetainers (photo d) (à défaut vénojects) de 10 ml au moins qui ont été scellés à la cire dure de caviste afin d'éviter la pollution par l'atmosphère externe.

Diapo 69: Sur le terrain, les expériences consistent généralement dans la collecte d'atmosphère accumulée sous des cloches mises en place pendant une durée déterminée selon le même type de dispositif qui a été illustré pour le CO_2.
Au laboratoire, les expériences conduites dans ce domaine visent à mesurer des activités dénitrifiantes en conditions non limitantes, à préciser les valeurs potentielles de dénitrification en fonction des conditions de milieu et les paramètres relatifs aux facteurs d'humidité, de température etc….
Elles peuvent être conduites sur des cylindres de sol en place ou sur sol remanié. Elles font parfois appel à des incubations en condition d'anaérobie strictes avec ou non présence d'acétylène. Pour ce faire on utilise un système semi automatisé, appelé inerteur, de conditionnement de l'atmosphère des flacons d'incubation permettant son remplacement par de l'hélium ou de l'azote.
Diapo 70: La mesure de dénitrification potentielle (avec blocage de la N_2O réductase par C_2H_2) sur des cylindres de sol en place réalisées au Costa Rica montre que le système cultural et la présence d'engrais peuvent avoir une forte influence sur ce paramètre.
Diapo 71: Sur un andosol du Costa Rica, il a été montré que la production de N_2O par nitrification restait dominante, même a des valeurs de WFPS très élevées (87%). Une bonne partie du N_2O produit est réduit jusqu'au stade ultime de N_2. Il faut toutefois rester prudent dans ces cas car le WFPS est fondé sur des déterminations de Densités apparentes, de densité réelle et d'humidité, trois concepts très difficiles à saisir dans les sols à forte proportion d'amorphes.
Diapo 72: L'utilisation d'acétylène pour bloquer la N_2O réductase montre que, si la dénitrification est une réalité sur une toposéquence de la région de Manga au Burkina faso, elle ne se traduit vraiment que par des conséquences agronomiques (perte de disponibilité en nitrates) car le N_2O formé est, après un temps de latence de quelques jours, complètement réduit jusqu'au stade N_2.
La position dans la toposéquence, donc le type de sol, différencie aussi fortement la dénitrification, sur les mêmes sites où l'on a montré que la volatilisation était dépendante du taux d'argiles. On n'a toutefois pas disposé, pour le paramètre dénitrification, d'assez de situations pour le relier à certains critères physico-chimiques.
Diapo 73: La mesure sur le terrain des flux de N_2O à partir de chambres de piégeage montre sur une étude conduite dans les cerrados brésiliens, malgré les 12 répétitions par traitement testé, une variabilité importante des résultats et une dynamique « erratique » sur un suivi régulier au cours d'une saison de culture. Ceci s'explique par une variabilité naturelle importante de ces émissions, un changement rapide des conditions d'émission lié au caractère « orageux » des pluies et aussi peut-être par des difficultés logistiques liées aux conditions de prélèvement, conservation et transfert des échantillons. Il n'est donc pas possible d'estimer à partir des seules mesures de terrain les émissions de N_2O durant la saison de culture. Cette estimation doit être faite à partir d'une modélisation, les données de terrain ne servant qu'à vérifier la validité de celles issues de la simulation.
Diapo 74: Cette modélisation est réalisée par NOE en utilisant des données « spécifiques au cas étudié » c'est-à-dire les données de terrain d'une part et des paramètres ajustés pour NOE, par exemple une limite entre les processus d'émission par nitrification et dénitrification pour un WFPS de 0.70 au lieu de 0.62 comme prévu initialement dans le modèle. Les résultats sont ensuite intégrés sur la période de suivi.

Diapo 75: Le déterminant majeur des émissions de N_2O, le WFPS est simulé au pas horaire en utilisant le modèle de simulation de l'état hydrique PASTIS. Ces valeurs sont ensuite utilisées par le modèle NOE pour quantifier les émissions par la voie « nitrification » ainsi que par la voie « dénitrification ». Dans le cas des cerrados brésiliens ces émissions sont faibles et majoritairement par dénitrfication lors d'épisodes brefs et intenses.
Diapo 76: La cohérence entre valeurs observées et simulées est assez décevante avec un assez grand groupe de valeurs, faibles en valeur absolue, pour lesquelles les valeurs simulées sont très supérieures à celles mesurées. On peut peut-être mettre en cause la conservation des échantillons qui s'avère bien meilleure si on utilise des tubes « exetainers » scellés à la cire. Il faut signaler aussi que la simulation a montré que la plupart des épisodes d'émissions avaient lieu en fin de nuit, début de matinée, horaire auquel il était difficile d'être opérationnel pour les prélèvements.
Diapo 77: C'est sur cette note mitigée que je conclurai ma présentation qui n'abordera pas certains aspects des techniques liées aux études de la Matière organique en science du sol, comme l'utilisation des méthodes isotopiques qui mériteraient un exposé à elles seules. Je vous remercie de votre attention et remercie aussi tous ceux qui, tout au long de mes travaux m'ont accompagné dans cette aventure et tout particulièrement l'équipe de Bambey : Francis Ganry, Pierre Siband et Jo Wey ainsi que Jean-Luc Marger mon compagnon au quotidien dans les labos de Montpellier.