



Disponibilité des résidus agricoles en Inde en vue d'une valorisation énergétique

Antoine Milhau, Abigaïl Fallot

► To cite this version:

Antoine Milhau, Abigaïl Fallot. Disponibilité des résidus agricoles en Inde en vue d'une valorisation énergétique. [Rapport de recherche] CIRAD-GREEN. 2011. <hal-01267740>

HAL Id: hal-01267740

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01267740>

Submitted on 4 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Disponibilité des résidus agricoles en Inde en vue d'une valorisation énergétique

Estimation de la disponibilité des résidus agricoles en tenant
compte des besoins des sols agricoles et de l'élevage

Antoine MILHAU
(milhau.antoine@gmail.com)

Étude coordonnée par Abigail FALLOT (fallot@cirad.fr)
pour la Chaire "Nouvelles Stratégies Énergétiques" des MINES Paristech,
et CIRAD PERSYST / UR42 Biomasse-énergie

Introduction.....	3
1. Caractérisation des usages agricoles des résidus de culture	4
1.1. Résidus de cultures et sols agricoles.....	4
1.1.1. Relation sol-résidus agricoles	4
1.1.2. Le maintien des résidus agricoles pour limiter l'érosion des sols	5
1.1.3. Le maintien des résidus agricoles pour conserver la fertilité des sols.....	6
1.2. Résidus de culture et élevage	7
1.3. État actuel de l'utilisation des résidus de cultures sur les sols agricoles indiens....	7
1.4. État actuel de l'utilisation des résidus de culture dans l'élevage indien.....	7
2. Estimation des besoins agricoles en résidus de culture	8
2.1. Les besoins des résidus agricoles pour les sols indiens : estimation du facteur sol	8
2.1.1. Principaux types de sols indiens et caractéristiques	8
2.1.2. Sensibilité des sols indiens à l'érosion.....	11
2.1.3. Estimation du facteur sol : « approche érosion »	13
2.1.4. Fertilité des sols indiens	16
2.1.5. Estimation du facteur sol : « approche fertilité ».....	16
2.2. Les besoins des résidus agricoles pour l'élevage indien : estimation du facteur élevage	18
2.2.1. Le cheptel en Inde	18
2.2.2. Les systèmes d'élevage en Inde	18
2.2.3. Détermination des besoins en résidus pour l'élevage	19
3. La disponibilité des résidus agricoles en Inde	21
3.1. Estimation de la disponibilité brute des résidus agricoles en Inde	21
3.2. Estimation de la disponibilité en tenant compte des usages agricoles.....	21
4. Conclusions et discussion.....	22
Bibliographie	23

Tableau 1: Bénéfices des résidus de culture sur les sols agricoles	5
Tableau 2: Disponibilité et besoins en alimentation animale en Inde en 2000 (source: FAO, 2004).....	7
Tableau 3: Les quatre principaux types de sols agricoles indiens et leurs caractéristiques....	10
Tableau 4: Principales cultures et risque d'érosion attribués aux sols agricoles indiens	12
Tableau 5: Taux de couverture des sols à assurer par les résidus pour limiter l'érosion des sols agricoles indiens.....	13
Tableau 6: Synthèse du calcul du facteur sol (* donnée non calculée faute de données).....	15
Tableau 7: Détermination du facteur sol en fonction des besoins pour protéger les sols de l'érosion et en maintenir la fertilité.	17
Tableau 8: Cheptel indien (moyenne des données FAO-Stat 2004-2008.....	18
Tableau 9: Hypothèses et calcul des quantités de résidus nécessaires pour assurer l'alimentation animale	20
Figure 1: Grands groupes de sols indiens (source: Husain, 2008)	9
Figure 2: Carte des lignes d'iso érosion en Inde (Singh, 1992)	12
Figure 3: Impact de la couverture du sol par les résidus sur l'érosion (Source: McCarthy et al. 1993).....	13
Figure 4: Abaque permettant de convertir le taux de couverture du sol en quantité de résidus.	14

Résumé

Ce travail réalisé dans le cadre de la Chaire "Nouvelles Stratégies Energétiques" en 2010 et 2011, cherche à quantifier la part des résidus agricoles qui devrait être réservée aux besoins agricoles avant d'estimer la disponibilité des résidus agricoles pour une valorisation énergétique. Dans une première partie, les usages des résidus de culture sont recensés et caractérisés en termes de principes agronomiques pour la conservation des sols et l'alimentation du cheptel. Cette compréhension des besoins agricoles en résidus conduit à bien distinguer différents types de résidus et différents contextes de production agricole et d'élevage. Pour l'ensemble de l'Inde, l'évaluation des besoins agricoles en résidus de culture est réalisée en y distinguant 4 principaux types de sols avec leurs besoins spécifiques et en y estimant la taille et composition du cheptel consommateur de résidus. Les besoins en matière de conservation des sols sont compris dans un intervalle allant de 50% à 100% des résidus générés selon la culture. Les besoins en matière d'alimentation animale sont évalués à 294 millions de tonnes par an soit 51% du volume total de résidus générés par les cultures.

Introduction

Les résidus agricoles (pailles, tiges, fanes, bagasse, etc.) constituent une ressource au potentiel énergétique prometteur. En effet ils sont coproduits par les activités agricoles (dans les parcelles cultivées) et industrielles associées (dans les industries agro-alimentaires). Ils sont ainsi générés en grandes quantités et sans surcoûts de production, partout où il existe de l'activité agricole. Leur valorisation, sous forme d'électricité par exemple, permettrait le développement d'une production d'énergie décentralisée et rurale tout en réduisant la dépendance énergétique, les dépenses et les émissions de gaz à effet de serre liées à l'importation et à l'utilisation de combustibles fossiles.

Cependant les résidus agricoles ont de multiples intérêts en agriculture, notamment pour la conservation de la qualité des sols et pour l'alimentation animale. Une mobilisation de l'ensemble des résidus au profit d'une filière énergétique peut donc avoir des conséquences directes sur l'état des sols, les rendements des cultures ou la production animale accompagnées d'impacts environnementaux et socio-économiques.

L'évaluation des volumes de résidus agricoles utilisés est donc un point central dans l'estimation de leur disponibilité en vue d'une valorisation énergétique. Peu d'études abordent cette estimation sous l'angle des besoins agricoles. Il est pourtant important de les considérer pour gérer au mieux le « stock » de résidus annuellement généré.

Dans cette étude nous analysons les besoins en résidus des sols et de l'élevage. Partant du principe que ces usages sont prioritaires nous estimons la disponibilité des résidus pour l'énergie.

1. Caractérisation des usages agricoles des résidus de culture

1.1. Résidus de cultures et sols agricoles

Les résidus agricoles, s'ils sont gérés de manière adéquate, permettent d'assurer le bon fonctionnement des sols agricoles et de les protéger des phénomènes érosifs. On considère leur retour au sol un usage prioritaire par rapport à la production d'énergie. Il serait très coûteux de remplacer les services qu'ils rendent aux agrosystèmes par des pratiques compensatrices et la durabilité des sols¹ ne serait pas assurée.

Une étude récente (Petrolia, 2008), réalisée dans le Minnesota établit qu'il n'y a pas ou très peu d'intérêt à prélever plus de résidus que ceux permettant de maintenir un taux d'érosion tolérable des sols.

1.1.1. Relation sol-résidus agricoles

Les résidus agricoles ne doivent pas être considérés comme de simples déchets résultant de la production agricole. Au contraire ils sont entièrement intégrés dans les mécanismes de formation et d'évolution d'un sol et ils en assurent la qualité à plusieurs niveaux:

- Qualité physique: les résidus constituent une protection contre l'érosion et améliorent la structure des sols
- Qualité chimique: les résidus sont source de matière organique, ils favorisent le recyclage des nutriments.
- Qualité biologique: les résidus sont source de nutriments pour les organismes décomposeurs dans les sols.

Plusieurs études soulignent les bénéfices des résidus agricoles pour les sols (Lal, 2005; Lal, 2009, Karlen et al. 2009). Ces derniers sont détaillés dans le tableau ci-dessous:

¹ Selon les recommandations de l'USDA il y a durabilité uniquement si les résidus sont prélevés sans que la qualité des sols n'en soit affectée.

Effets primaires	Effets secondaires	Effets tertiaires	Bénéfices agricoles
Barrière physique	Protection contre le rayonnement solaire	Limite l'érosion de la couche superficielle du sol	Conservation de la couche fertile du sol.
	Protection contre le vent		
	Protection contre la pluie		
	Limitation du ruissellement des eaux		
	Amélioration de l'infiltration des eaux	Améliore le bilan hydrique	Limite les besoins d'irrigation
	Limitation de l'évaporation		
	Régulation de la température du sol		
	Limitation du développement des adventices	Limite la concurrence avec la culture	Limite l'utilisation d'herbicides
Source de matière organique	Apport d'éléments organiques	Améliore la structure du sol. Meilleure disponibilité des nutriments pour la plante. Meilleure disponibilité en eau (rétention améliorée)	Limite le tassement des sols. Limite l'utilisation de fertilisants. Limite les besoins d'irrigations
	Apport de matière pour les organismes décomposeurs (macro-invertébrés, micro-organismes, champignons...)	Meilleur fonctionnement biologique Meilleure disponibilité des nutriments pour la plante.	Limite l'utilisation de fertilisants. Maintien de la fertilité.

Tableau 1: Bénéfices des résidus de culture sur les sols agricoles

Dans le tableau 1 on note que l'impact des résidus sur le fonctionnement et la qualité des sols peut se traduire en bénéfices agronomiques pour l'agriculteur, notamment pour:

- la conservation de ses sols
- le maintien de bons rendements
- l'absence d'augmentation de la charge de travail pouvant être liée à des pratiques pour compenser le déficit de retour au sol des résidus.

Si l'on considère la parcelle à court terme alors les résidus ont un impact positif sur les rendements des cultures. A long terme ils maintiennent la productivité ainsi que la durabilité agronomique des sols (Lal, 2009).

1.1.2. Le maintien des résidus agricoles pour limiter l'érosion des sols

De nombreux travaux mettent en évidence le rôle des résidus pour limiter l'érosion des sols. Aux États-Unis, l'exportation de la totalité des résidus entraînerait une érosion plus de 10 fois supérieur au seuil de perte tolérable de sol (Wilson et al., 2004; Pimentel, 2006). Une autre expérimentation (Harrold et al. 1969) conduite aux États-Unis illustre et insiste sur l'impact positif des résidus sur la limitation des phénomènes d'érosion. Lors d'un orage avec plus de 14 cm de précipitations en sept heures:

- sur un sol moyennement pentu (6,6%) labouré où tous les résidus ont été exportés alors le ruissellement atteint 11,2 cm (soit 80% du volume de précipitations) et l'érosion provoqua une perte de sol proche de 51 tonnes/ha.

- sur un sol beaucoup plus pentu (en moyenne 20,7%) mais non travaillé et où les résidus ont été laissés sur place alors le ruissellement resta limité à 6,4cm (soit 45% du volume des précipitations) et les pertes de sol à 70 kg/ha.

D'autres expérimentations menées dans d'autres régions du monde montrent des résultats similaires. En Afrique, sur un sol très érodible (Sol rouge de type Alfisol avec 15% de pente), avec exportation totale des résidus alors les pertes de sol peuvent atteindre plus de 100 t/ha/an. L'application de résidus (à 6 tonnes/ha) permet, dans cette expérimentation, de réduire la perte de sol à moins de 1 tonne/ha (Lal, 1976).

1.1.3. Le maintien des résidus agricoles pour conserver la fertilité des sols

Outre leur capacité à limiter l'érosion, les résidus de culture améliorent aussi la composition chimique et le fonctionnement biologique des sols. Cela se traduit par une conservation de la fertilité des sols d'un cycle cultural à l'autre.

En effet lors de leur croissance les cultures puisent dans les sols les éléments nutritifs dont elles ont besoin. Lors de la récolte une partie de ces éléments est exportée avec le produit principal. Une autre partie peut être restituée au sol et recyclée en laissant les résidus agricoles se décomposer sur place. Si on exporte les résidus hors de la parcelle alors il n'y a plus de flux assurant un recyclage de la matière et il faut le compenser par sous forme d'autres apports de matière organique (fumure...) ou sous forme de fertilisants minéraux.

Le simple maintien des résidus difficiles à récolter (ex: racines, chaumes...) ne permet pas d'assurer un apport suffisant de carbone au sol et le stock de carbone organique dans le sol² diminue (Clapp et al., 2000; Wilhelm et al., 2004).

L'expérimentation de Blanco-Canqui et al. (2007) permet d'illustrer l'importance de la gestion des résidus agricoles quant à la fertilité des sols. Pendant 2 ans et demi et sur 3 terrains différents (en terme de pente et de pédologie) aux Etats-Unis, ils ont mesuré les effets de la récolte des tiges de maïs sur la séquestration du carbone organique du sol, les émissions de CO₂, la productivité et les caractéristiques physiques des sols. Les principaux résultats sont les suivants:

- Un taux d'enlèvement des résidus supérieur à 25% provoque une diminution de la séquestration du carbone organique dans les sols et une diminution de la productivité. Mais l'ampleur dépend de la pédologie et du type de sol.
- Un taux d'enlèvement de 50% réduit à la fois le rendement en grain et le rendement en tiges. Il provoque une diminution notable de la quantité de carbone organique séquestré dans le sol et les phénomènes d'érosion s'amplifient.
- Sur 2 types de sol le taux d'infiltration d'eau dans le sol est réduit de manière significative dès que l'on dépasse les 25% d'enlèvement des résidus.
- La disponibilité d'eau pour la plante ainsi que la population de lombrics diminuent de manière significative sur tous les sols dès qu'on atteint les 50% de taux d'enlèvement des résidus.

² COS ou SOC en anglais pour Soil Organic Carbon

Les stocks de SOC dans les principaux sols tropicaux et subtropicaux asiatiques ont souvent un niveau très bas, situé entre 2-5 g/kg (Lal, 2007). Cela est principalement dû à:

- l'exportation importante des résidus pour l'élevage, le combustible domestique, les matériaux de construction (Lal, 2007)
- le climat tropical qui accélère la diminution du stock

La restauration du stock de COS pourrait améliorer la production agronomique, améliorer l'efficacité des fertilisants ou d'autres amendements. D'après Lal (2006), une augmentation du stock de SOC d'1 tonne de Carbone/ha/an permettrait d'améliorer considérablement le niveau de production agricole dans les pays en voie de développement. L'augmentation générale de production serait comprise entre 30 et 51 millions de tonnes/an (24-39 millions de tonnes/an pour les principales céréales et légumineuses et 7-11 millions de tonnes pour les principaux tubercules).

1.2. Résidus de culture et élevage

Les résidus agricoles constituent un élément indispensable en matière d'élevage animal. Il existe deux usages distincts:

- Litière : il s'agit principalement des pailles utilisées dans les étables pour isoler les animaux du sol et récupérer leurs déjections.
- Alimentation : bien que caractérisés par une faible valeur nutritive les résidus primaires constituent une part importante de l'alimentation des ruminants (bovins, ovins, caprins principalement) dans le monde. Les résidus secondaires (balle de riz, tourteaux, etc.) ont une meilleure teneur énergétique mais sont souvent réservés aux élevages ayant un objectif de productivité élevé.

1.3. État actuel de l'utilisation des résidus de cultures sur les sols agricoles indiens

L'érosion des sols est un phénomène important en Inde. Naravana et Ram Babu (1983) estiment que 53% du territoire indien est affectée de manière importante par ce phénomène.

1.4. État actuel de l'utilisation des résidus de culture dans l'élevage indien

L'Inde est déficitaire en alimentation animale (FAO, 2004) comme le montre la situation de la disponibilité en aliments pour animaux en 2000 (tableau 2). Les résidus agricoles ne permettent pas de subvenir aux besoins des animaux et les fourrages verts et les concentrés, eux-aussi insuffisants, ne peuvent le compenser.

Type d'aliment	Disponibilité (Mt)	Besoins (Mt)	Déficit (%)
Fourrages secs (résidus de récolte)	523,61	632,61	17,30%
Fourrages verts	573,5	830,12	31,00%
Concentrés	46,18	88,05	47,60%

Tableau 2: Disponibilité et besoins en alimentation animale en Inde en 2000 (source: FAO, 2004)

Chaque année la production animale augmente pour répondre aux besoins d'une population croissante. Ajouté à l'expansion des zones urbaines il en résulte une diminution des terres pour le pâturage ou la production de fourrage ainsi qu'une dégradation des prairies par surpâturage (Singh et al.). Dans ce contexte l'alimentation animale est se retrouve plus dépendante encore quant à la disponibilité des résidus de cultures.

Tous les animaux d'élevage n'ont pas les mêmes besoins en résidus agricoles Ainsi, les petits ruminants puisent leur nourriture principalement par pâturage des prairies, terrains communaux, bords de route ou chaumes après récolte (Birthal et Parthasarathy Rao, 2002, Parthasarathy Rao et al. 2008). Les résidus agricoles (principalement de céréales et légumineuses) constituent par contre 45 à 60% (en poids sec) de la ration alimentaire des grands ruminants. Ces derniers puisent le reste de leur alimentation des prairies, forêts, friches et jachères (Devendra et al. 2000; Kelley et al. 1993; Kelley and Parthasarathy Rao 1996 et Parthasarathy Rao and Hall 2003). Les concentrés sont réservés aux animaux en lactation, aux animaux à haut rendement et aux animaux de travail (Birthal et Parthasarathy Rao, 2002).

Nous avons vu l'importance de l'utilisation des résidus en matière de gestion durable des sols agricoles et d'alimentation animale. Partant du principe que ceux-ci devraient, en priorité, être destinés à satisfaire les besoins des sols et de l'élevage et du constat que, actuellement, les pratiques agricoles en Inde n'assurent pas ces besoins nous abordons l'estimation de la disponibilité des résidus sous un angle agronomique. Peu d'études analyse de manière précise les besoins agricoles en résidus à l'échelle d'un pays, aussi cette approche se veut innovante et demanderait à être approfondie. Nous nous détachons des pratiques actuelles en Inde et nous nous focalisons sur les besoins agricoles en Inde.

L'objectif est d'évaluer les quantités de résidus qu'il serait nécessaire de mobiliser pour répondre aux besoins agricoles en terme de maintien de la qualité des sols et d'alimentation animale. Une fois cette donnée obtenue, nous analyserons ce qui en résulte quant à la disponibilité des résidus agricoles pour la production d'énergie.

Dans un premier temps nous évaluons les besoins en résidus, principalement primaires, pour assurer la conservation des sols. Puis nous calculons les quantités de résidus nécessaires à l'alimentation du cheptel indien.

2. Estimation des besoins agricoles en résidus de culture

2.1. Les besoins des résidus agricoles pour les sols indiens : estimation du facteur sol

2.1.1. Principaux types de sols indiens et caractéristiques

L'Inde se caractérise par une importante diversité de reliefs, de formations géologiques et de conditions climatiques. Il en résulte une grande variété de type de sols aux caractéristiques physico-chimiques différentes. Chacun est plus ou moins fertile, sensible à l'érosion...

Selon le type de sol, les conclusions quant aux quantités de résidus à retourner ne seront pas les mêmes. A l'échelle de l'Inde nous adoptons une typologie des sols agricoles dont nous caractérisons la sensibilité à l'érosion et la fertilité. Nous choisissons la classification de

Govindarajan et Gopal Rao (1978) qui est reprise dans plusieurs études et par plusieurs organismes tel que la FAO (2005) ou le conseil indien de la recherche agricole (Indian Council of Agricultural Research: ICAR³). Elle distingue 8 grands types de sols :

- Sols salins
- Sols désertiques
- Sols forestiers
- Sols tourbeux/marécageux
- **Sols alluviaux**
- **Sols noirs**
- **Sols rouges**
- **Sols latéritiques**

Les quatre dernières catégories correspondent aux principaux sols agricoles. La figure 1 illustre leur répartition géographique et le tableau 3 leurs caractéristiques et les principales cultures qu'on y cultive.

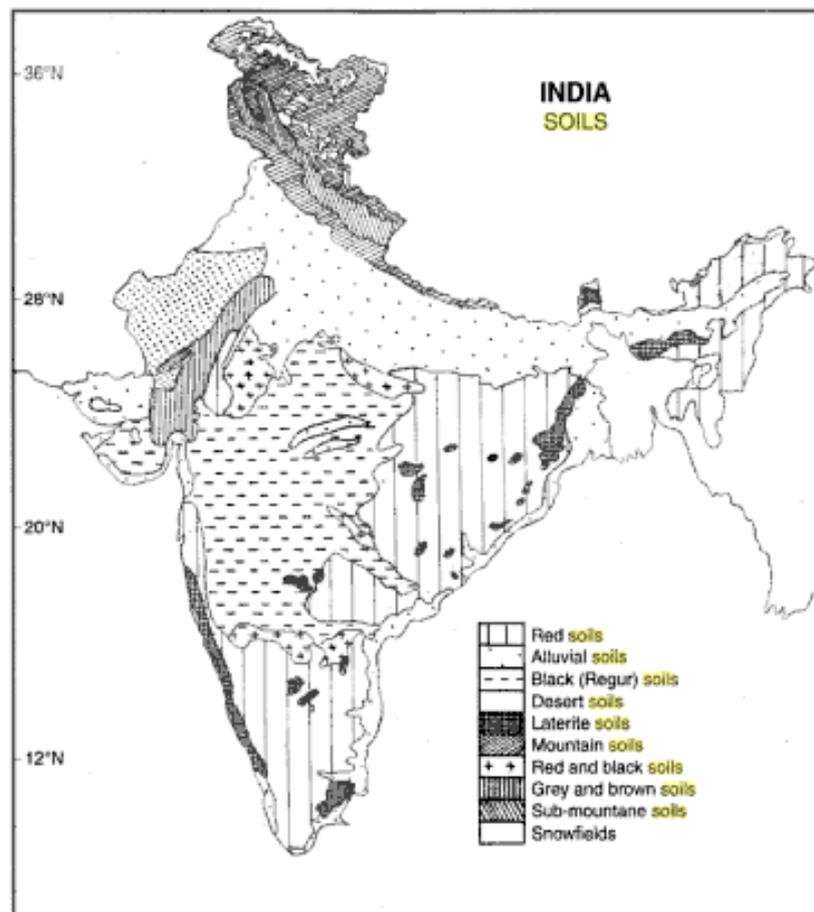


Figure 1: Grands groupes de sols indiens (source: Husain, 2008)

³ http://www.winentrance.com/general_knowledge/geography/Soils-India.html

Sols	Localisation en Inde	Superficie (Husain, 2008)	Formation	Caractéristiques indiennes de ces sols.	Cultures adaptées
Sols Alluviaux (Alluvial soil)	Plaines de l'Indus, du Gange et du Brahmapoutre. États du Punjab, Haryana, Uttaranchal, Uttar Pradesh, Bihar, Bengal de l'Ouest, Assam et les régions côtières.	143,1 millions d'hectares (43,4% de la superficie du pays)	Ces sols se forment principalement à partir de sédiments issus des roches érodées dans la chaîne Himalayenne et transportés par les cours d'eau.	Très étendus et fertiles, ils contribuent le plus à la richesse agricole du pays (FAO 2005). Ils ont une structure sableuse à argilo-limoneuse	Une grande variété de cultures peut être cultivée sur ce type de sol. Parmi les mieux adaptées en Inde: Riz, blé, canne à sucre, jute, coton.
Sols Noirs (Vertisols, Black soil, regur soil, black cotton soil)	Principalement dans les états du centre, de l'Ouest et du Sud de l'Inde. Maharashtra et Madhya Pradesh sont les états concentrant la majeure partie des vertisols.	49,8 millions d'hectares (15,1% de la superficie du pays)	Sols issus de roches volcaniques dans des conditions à la fois humide et chaude. Soumis à de fortes sécheresses, lorsqu'il pleut ils s'humidifient en profondeur, les argiles gonflent et emprisonnent de la matière organique.	Très foncés et fertiles. Leur structure argileuse leur confère une importante capacité de rétention d'eau. Par temps secs ils sont durs et par temps humide ils peuvent être très collants.	Bien que fertiles ces sols sont difficiles à cultiver. Sans irrigation ils sont utilisés pour la culture du coton, millet, soja, sorgho ou pois d'Angole. Avec irrigation ils se prêtent à la culture de la canne à sucre, du blé, riz, tabac ou agrumes.
Sols Rouges (Red soil)	Prédominant dans les états d'Andhra Pradesh, Tamil Nadu, Karnataka, Maharashtra, Orissa, Goa et les états du Nord.	61 millions d'hectares (18,5% de la superficie du pays)	Ces sols se sont formés à partir d'anciennes roches cristallines et métamorphiques.	Texture sableuse et pauvres en argile. Caractérisés par une faible profondeur, une faible capacité de rétention d'eau, un drainage et un ruissellement excessif.	Avec une gestion adéquate ces sols permettent de cultiver de nombreuses cultures: millet, riz, arachide, maïs, soja, pois d'angole, haricot mungo, jute, thé, noix de cajou, cacao, vigne, banane, papaye et mangue.
Sols Latéritiques	On les rencontre dans les états Kerala, Tamil Nadu, Karnataka, Andhra Pradesh et dans la région du Nord Est de l'Inde.	12,2 millions d'hectares (3,70% de la superficie du pays)	Ce sont des sols résultent du lessivage (forte érosion hydrique) de sols formés dans des conditions de sécheresse et hautes températures avec des alternances de périodes pluvieuses.	Structure argileuse. Très durs on en extrait des briques de construction. Ils peuvent présenter une toxicité liée à la teneur en aluminium et manganèse. Très peu d'humus car les organismes décomposeurs sont inhibés par la chaleur.	On y cultive le riz, la banane, la noix de coco, le cacao, la noix de cajou, le café, le thé, l'Aréquier.

Tableau 3: Les quatre principaux types de sols agricoles indiens et leurs caractéristiques

2.1.2. Sensibilité des sols indiens à l'érosion

L'érosion des sols est un phénomène important en Inde (Naravana et Ram Babu, 1983 ; Morris, 1995; Shangle, 1991) et parfois désastreux (Kothyari et al., 1996).

Singh et al. présentent en 1992 une carte représentant les courbes d'iso-érosion en Inde. Cette carte a été réalisée en recoupant des données concernant l'érosivité des pluies, les sols indiens, leur occupation, la dégradation des sols, l'irrigation, les pertes de sol mesurées dans différentes stations et les pertes de sol estimées avec l'équation RUSLE dans différents endroits du pays.

La carte ainsi obtenue (figure 2) nous permet de nous visualiser la répartition géographique et l'importance des phénomènes d'érosion en Inde. Il apparaît que:

- les sols de la chaîne Himalayenne sont soumis à d'importants phénomènes érosifs, notamment dans les collines Shivalik. Cette érosion est principalement due aux fortes pentes et au climat. Les particules érodées sont transportées par les cours d'eau dans les plaines alluviales.
- les sols de la plaine Indo-Gangétique, du Punjab, de l'Haryana, de l'Utar-Pradesh, du Bihar et du Bengale affichent un taux d'érosion modéré: entre 5 et 10 tonnes/ha/an. Il s'agit des états situés au Nord du pays dont les sols sont principalement alluviaux.
- les sols alluviaux situés à proximité des cours d'eau sont toutefois soumis à des taux d'érosion beaucoup plus importants (40 tonnes/ha/an) dus à la force hydraulique.
- les sols noirs sont affectés de manière importante par l'érosion avec des valeurs avoisinant les 20 tonnes/ha/an. C'est particulièrement le cas dans les états du Karnataka, d'Andhra Pradesh, de Madhya Pradesh et de Maharashtra: c'est à dire la partie Ouest du pays, occupée par le plateau de Deccan.
- les sols rouges des Ghats occidentaux (partie côtière située au Sud Ouest du pays, l'état du Kerala) sont très affectés par l'érosion avec des taux situés entre 20 et 35 tonnes/ha/an.
- les sols rouges au Nord du pays ont aussi des valeurs de 20 tonnes/ha/an, tandis que dans le centre du pays ces valeurs sont plus modérées (entre 10 et 15 tonnes/ha/an).
- le Nord-Ouest (partie Ouest de l'état du Rajasthan) du pays est fortement affecté par l'érosion éolienne (partie désertique).

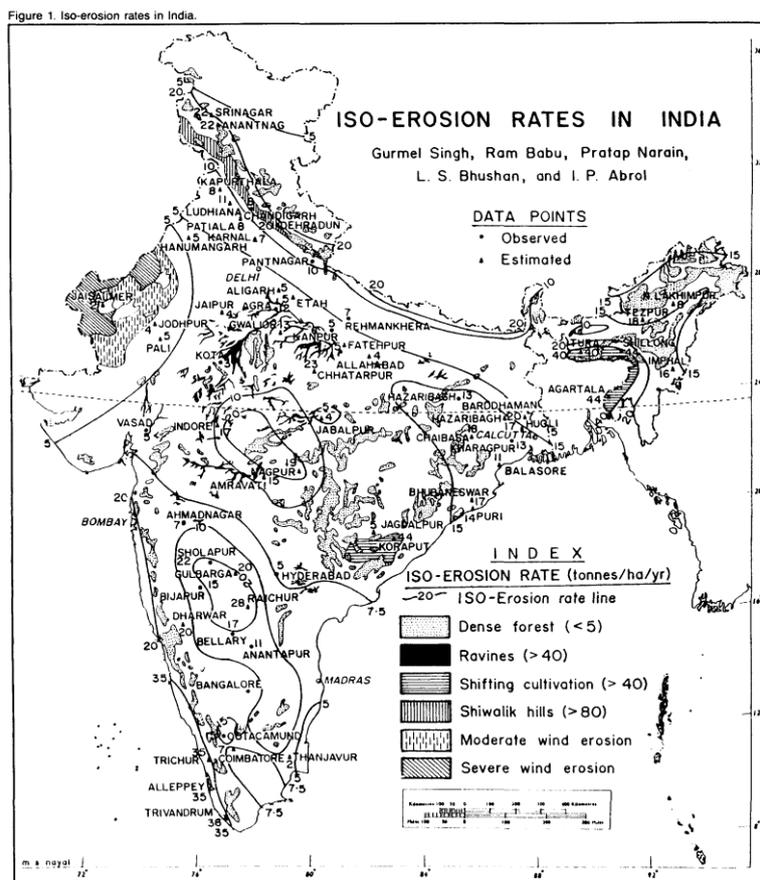


Figure 2: Carte des lignes d'iso érosion en Inde (Singh, 1992)

En recoupant les informations recueillis nous pouvons attribuer à chaque type de sol :

- une valeur représentative du risque d'érosion : faible modéré et fort. Celle-ci nous permettra par la suite de déterminer la quantité de résidus à retourner au sol pour annuler ce risque.
- Leurs principales cultures. Chacune a son propre « rendement » en résidus⁴ ce qui implique que la part des résidus exportables après récolte est variable d'une culture à l'autre.

Le tableau 4 synthétise ces attributions.

	Cultures principales	Risque d'érosion
Sols alluviaux	Riz, blé, canne à sucre, oléagineux	Faible
Sols rouges	Millet, riz, arachide, maïs, noix de cajou, légumineuses	Modéré
Sols latéritiques	Riz, noix de coco, noix de cajou	Modéré
Sols noirs	Coton, pois d'angole, canne à sucre, blé, millet, soja, sorgho, oléagineux	Fort

Tableau 4: Principales cultures et risque d'érosion attribués aux sols agricoles indiens

⁴ Lié au Ratio Résidus sur produit principal (RRP) de la culture. Le RRP nous permet de déterminer la quantité de résidus générée par unité de produit principal récolté. Ainsi pour la paille de blé on a un RRP de 1,3. Cela signifie qu'un kilogramme de blé récolté laisse 1,3 kg de paille. La valeur de ce ratio varie d'un résidu à l'autre.

2.1.3. Estimation du facteur sol : « approche érosion »

Pour protéger efficacement un sol de l'érosion il est nécessaire de conserver une certaine quantité de résidus. Dans le cas de l'érosion hydrique, cette quantité est très variable d'un sol à l'autre, d'une région à l'autre. Mais la plupart des études s'accordent à dire qu'il est nécessaire de maintenir au minimum 30% de la surface du sol couverte par les résidus (Andrews, 2006; Milbrandt, 2005, Bussiere, 1996). A partir de 50 % de couvert il est établi que la protection devient intéressante puisque le coefficient de ruissellement par rapport à un sol nu est divisé par deux (Bussiere, 1996).

La figure suivante illustre la diminution exponentielle du taux d'érosion à mesure qu'augmente la couverture du sol par les résidus (McCarthy et al. 1993). On y observe que :

- 30% de couverture réduisent de moitié le taux de perte de sol par rapport à un sol nu
- 50% de couverture divisent par trois le risque d'érosion
- 100% de couverture tendent à annuler le taux de perte de sol et donc le risque d'érosion

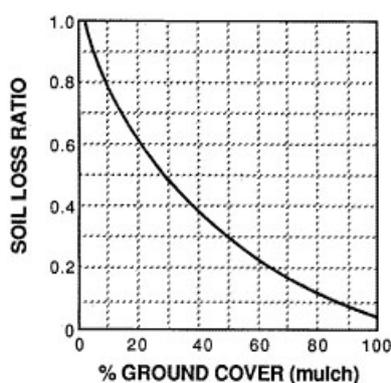


Figure 3: Impact de la couverture du sol par les résidus sur l'érosion (Source: McCarthy et al. 1993)

Cette figure est à mettre en relation avec le risque érosif attribué à chaque grand type de sol (cf. tableau 4).

- Pour les sols « peu sensibles » à l'érosion (sols alluviaux) la couverture minimale de 30% est retenue.
- Pour les sols à « risque modéré » alors 60% de couverture au sol sont retenus. Ils réduisent le taux de perte de sol à 25%.
- Pour les sols ayant un important risque érosif (sols noirs) alors la couverture totale est retenue.

Type de sol	Risque érosif	Taux de couverture du sol
Alluviaux	Faible	30%
Rouges et latéritiques	Modéré	60%
Noirs	Fort	100%

Tableau 5: Taux de couverture des sols à assurer par les résidus pour limiter l'érosion des sols agricoles indiens.

Les résidus de chaque culture, en raison de leur morphologie différente, n'ont pas le même potentiel à couvrir le sol. Pour chaque culture nous convertissons donc le taux de couverture

de sol désiré (tableau 5) en quantité équivalente de résidus (en tonnes de résidus par hectare). Pour cela nous utilisons un abaque graphique de l'USDA (2002).

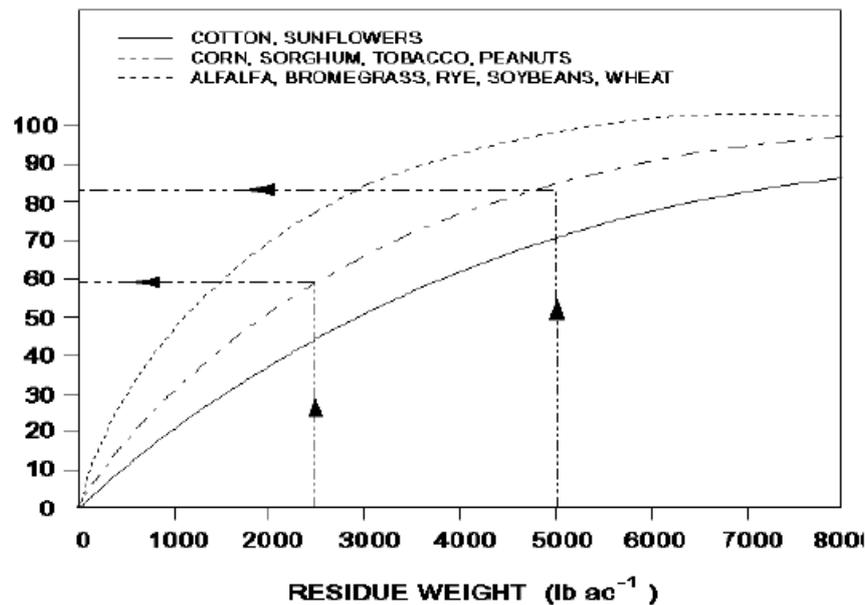


Figure 4: Abaque permettant de convertir le taux de couverture du sol en quantité de résidus. Mode de lecture: Sur l'axe des abscisses on peut lire le taux de couverture du sol (en %) et sur l'axe des ordonnées le poids des résidus (en lb/ac). Il y a 3 courbes, chacune correspond à différent type de culture. Par exemple 60% de couverture du sol

Nous calculons ensuite le rendement des résidus en Inde à partir de celui de la culture (données FAO-Stat, 2004-2008) et du RRP. La différence entre ce dernier la quantité de résidus à maintenir au sol (figure 4) nous permet de déterminer s'il y a :

- un surplus de résidus. Dans ce cas il est possible de fournir les résidus nécessaires pour protéger les sols de l'érosion et à la fois d'exporter le « surplus ». Dans ce cas le facteur sol calculé est inférieur à 1.
- un déficit en résidus. Dans ce cas le facteur sol est supérieur à 1. La quantité de résidus générés par unité de surface est inférieure à celle nécessaire pour couvrir cette même surface.

Ces calculs sont synthétisés dans le tableau de résultats 6.

Types de sol	Cultures	Taux de couverture nécessaire pour limiter l'érosion	Quantités de résidus équivalente pour assurer la couverture nécessaire (t/ha)	Rendement culture (t/ha)	RRP	Rendement résidus (t/ha)	Quantités extractibles /Deficit (t/ha)	Facteur sol
Sols alluviaux	Riz	30%	0,56	3,2	1,5	4,8	4,24	0,12
	Blé		0,56	2,69	1,5	4,04	3,48	0,14
	Canne à sucre		1,12	65,79	0,1	6,58	5,46	0,17
	Colza/moutarde		0,56	1,08	1,8	1,94	1,38	0,29
	Tournesol		1,68	0,63	2	1,26	-0,42	1,33
Sols rouges et latéritiques	Riz	60%	1,68	3,2	1,5	4,8	3,12	0,35
	Millet		1,68	0,94	1,8	1,69	0,01	0,99
	Arachide		2,8	1,14	2,2	2,51	-0,29	1,12
	Maïs		2,8	2,1	2	4,2	1,4	0,67
	Pois chiches		2,8	0,81	1,3	1,05	-1,75	2,67
	Noix de coco							*
	Soja		1,68	1,06	1,35	1,43	-0,25	1,17
	Pois d'Angole							*
Sols noirs	Riz	100%	5,6	3,2	1,5	4,8	-0,8	1,17
	Blé		5,6	2,69	1,5	4,04	-1,56	1,39
	Coton		11,2	1,18	3	3,54	-7,66	3,16
	Pois d'Angole							*
	Sorgho		8,96	0,85	1,7	1,45	-7,51	6,18
	Canne à sucre		8,96	65,79	0,1	6,58	-2,38	1,36

Tableau 6: Synthèse du calcul du facteur sol (* donnée non calculée faute de données)

On constate que:

- sur les sols alluviaux:
 - presque toutes les cultures génèrent suffisamment de résidus pour assurer un minimum de 30% de couverture. Il est possible d'exporter de la parcelle la majorité des résidus de riz, blé, canne à sucre et colza.
 - Seul le tournesol ne produit pas assez de résidus primaires (déficit de 420 kg/ha). Ils ne sont donc pas mobilisables pour la production d'énergie, et si l'on raisonne en priorité sur l'érosion alors ils ne sont pas non plus disponibles pour l'alimentation animale ou autre.
- sur les sols rouges et latéritiques:
 - l'arachide et le soja ne génèrent pas assez de résidus pour assurer la couverture nécessaire des sols. Le déficit est léger (300kg/ha) mais suffit à éliminer ces résidus de la liste de ceux disponibles pour l'énergie.
 - Le millet génère une juste assez de résidus pour couvrir le sol.
 - Le pois-chiche génère trop peu de résidus pour un sol à risque érosif modéré. (déficit de 1,75 t/ha). Dans ce cas les résidus sont largement insuffisants et il convient d'adopter d'autres pratiques pour conserver le sol.
 - Le riz produit suffisamment de paille pour que 65% des quantités générées puissent être exportées de la parcelle sans que cela affecte la protection du sol contre l'érosion. Le maïs produit lui aussi un surplus de résidus mais en quantité plus faible que le riz: 33% peuvent être exportés.
- sur les sols noirs:
 - Les résidus de toutes les cultures sont déficitaires pour protéger les sols contre l'érosion. Sur ces sols on peut donc recommander de n'exporter aucun résidu pour l'énergie.

2.1.4. Fertilité des sols indiens

L'Inde étant un pays majoritairement tropical, ses sols se caractérisent par un taux de carbone organique faible. Le déficit en azote est aussi très marqué dans les sols indiens. De manière générale on note aussi un appauvrissement en P, K et S, en nutriments principaux et secondaires et micronutriments (FAO, 2005). Motsara (2002) identifie l'appauvrissement de la teneur en éléments minéraux dans les sols indiens.

Cette diminution de la fertilité peut s'expliquer d'une part par le climat tropical mais aussi par les pratiques agricoles liées à la gestion des résidus qui sont généralement exportés pour les besoins de l'alimentation animale ou qui sont brûlés sur place pour permettre l'implantation de la culture suivante.

2.1.5. Estimation du facteur sol : « approche fertilité »

Suite à « l'approche érosion » il apparaît d'ores et déjà que la totalité des résidus générés par plusieurs cultures doivent être retournés au sol. Ces quantités sont parfois même très insuffisantes pour assurer une protection efficace.

Dans « l'approche fertilité » nous ne considérons que les résidus précédemment identifiés comme « exportables » :

- riz, blé et canne à sucre sur les sols alluviaux
- riz et maïs sur les sols rouges et latéritiques

Pour déterminer les proportions de résidus à retourner au sol nous nous basons sur des études indiennes relatives à l'impact de la gestion des résidus agricoles sur les sols. Il existe actuellement peu d'études de ce type. En Inde elles concernent principalement la rotation riz-blé. Ainsi, Sarkar (1997) étudie entre 1990 et 1992, dans un système de culture riz-blé sur sols alluviaux (à faible teneur en carbone organique: 0,38%), différents types de gestion des résidus (enlèvement total, enlèvement partiel, pas d'enlèvement) couplés à différentes pratiques de fertilisation (absence ou standard 120-60-60). Il analyse l'impact de ces pratiques sur les rendements:

- Les meilleurs rendements sont obtenus en laissant 50% des résidus au sol et en ajoutant l'engrais minéral.
- L'enlèvement total des résidus et l'emploi uniquement de l'engrais minéral fournit aussi de bons résultats de production mais cependant cette pratique est plus coûteuse que la première.
- En comparant les pratiques « 100% résidus laissés au sol – 0% fertilisation » et « 50% résidus laissés au sol – 0% fertilisation », alors on se rend compte que la différence de rendement n'est pas significative.

Cette étude met en évidence que, pour le riz et le blé cultivés sur sol alluvial, il est possible d'extraire 50% des résidus au sol sans affecter les rendements, au moins à court-terme.

Cette approche permet d'attribuer un facteur sol de 0,5 pour les pailles de riz et de blé sur sols alluviaux. L'approche érosion préconisait des valeurs inférieures (respectivement 0,12 et 0,14), dans ce cas le maintien de la fertilité des sols alluviaux est le facteur limitant et le facteur sol le plus élevé est retenu (tableau 7).

Culture	Facteur sol en considérant uniquement l'aspect érosion	Facteur sol en considérant uniquement l'aspect fertilité des sols	Facteur sol retenu pour répondre à la fois aux besoins érosion et fertilité du sol
Riz	0,12	0,5	0,5
Blé	0,14		

Tableau 7: Détermination du facteur sol en fonction des besoins pour protéger les sols de l'érosion et en maintenir la fertilité.

2.2. Les besoins des résidus agricoles pour l'élevage indien : estimation du facteur élevage

En Inde l'élevage est une activité importante et l'alimentation animale repose en majeure partie sur les résidus agricoles. Il existe déjà un déficit en résidus pour l'alimentation (FAO, 2004) et s'il augmentait il pourrait menacer la production animale. Cela nous amène à considérer l'alimentation animale, au même titre que le retour au sol, comme prioritaire par rapport à la production d'énergie.

Pour évaluer les quantités de résidus nécessaires pour l'alimentation animale nous allons caractériser le cheptel indien et déterminer ses besoins alimentaires.

2.2.1. Le cheptel en Inde

D'après les statistiques agricoles indiennes, le pays dispose d'une importante population animale. L'Inde compte 485 millions de têtes de bétail, soit 11% de la population mondiale. Plus de 280 millions sont des bovins (bovins vrais et buffles) soit près de 18% de la population mondiale. La quantité des animaux est en augmentation depuis plusieurs années.

Animaux	Quantités d'animaux (Moyenne 2004-2008 en milliers d'animaux)
Bovins vrais (Vaches, taureaux, bœufs...)	178 728
Buffles	102 204
Total bovins	280 932
Total ovins	63 565
Total caprins	125 181
Total porcins	13 652
Chevaux	751
Mulets	176
Ânes	650
Total Équidés	1 577
Camélidés	632
TOTAL BÉTAIL	485 539
Poules	530 600
Canards	33 500
TOTAL VOLAILLE	564 100

Tableau 8: Cheptel indien (moyenne des données FAO-Stat 2004-2008)

2.2.2. Les systèmes d'élevage en Inde

En Inde on peut rencontrer les trois grands systèmes d'élevage dans lesquels les résidus agricoles n'ont pas la même importance :

- système à l'herbe: on les rencontre principalement dans les zones arides (Nord-Ouest, déserts du Rajasthan et du Gujarat) et dans les zones montagneuses (chaîne himalayenne). Les troupeaux se déplacent selon la disponibilité en herbe. Dans les

plaines la quantité de fourrage est toujours restreinte et complétée par le pâturage forestier et l'achat de résidus de récolte.

- système industriel: principalement dans les zones urbaines et périurbaines, là où la demande en produits animaux est élevée et où la disponibilité des terres est faible. C'est un système intensif, avec utilisation d'animaux de qualité (Birthal et al. 1999). Principalement pour la production d'œufs, poulets, cochons et lait. Les résidus agricoles sont utilisés mais en complément d'aliments plus riches permettant d'améliorer la productivité. Les résidus agricoles sont importants en tant que litière puisque ce sont des systèmes hors sol.
- système mixte culture-élevage: en Inde c'est le système d'élevage le plus répandu (Parthasarathy Rao et Hall, 2003; Erenstein et al., 2007; Chand et al. 2008). Les résidus agricoles constituent la principale source d'alimentation (jusqu'à 60% de la ration alimentaire en poids sec).

2.2.3. Détermination des besoins en résidus pour l'élevage

A partir des informations sur l'élevage en Inde et l'utilisation des résidus en tant qu'aliment pour les animaux nous pouvons calculer les besoins de l'élevage en résidus agricoles. Nous nous basons sur des principes généraux en matière d'alimentation des ruminants et sur les hypothèses décrites dans le tableau 9 pour calculer ces besoins :

Etape	Hypothèse	Justification	Calcul
Animaux consommant des résidus agricoles	On ne tient compte que des buffles et bovins vrais élevés dans un système mixte culture-élevage. On considère que les animaux en système mixte culture-élevage représentent 70% du cheptel considéré.	Les buffles et bovins en système mixte sont les principaux consommateurs de résidus agricoles (cf. paragraphe 1.4) Le système mixte culture-élevage concentre la majeure partie des animaux d'élevage (cf. paragraphe 2.2.2)	Population totale de buffle et bovins en Inde : 280 millions d'animaux (tableau 8) Population en système mixte : $280 \times 0,7 = 196 \text{ millions d'animaux}$
Ration journalière devant être ingérée par les animaux considérés	On estime que les besoins journaliers des animaux sont de 2% (de Matière sèche) du poids vif des animaux. On considère un poids moyen de de 500kg/bovin :	D'après avis d'expert	Ration journalière $500 \times 0,02 = 10 \text{ kg/animal/jour}$
Part des résidus dans cette ration journalière	La part des résidus de culture dans la ration des bovins en Inde est supposée de 60%.	Paragraphe 1.4, d'après Parthasarathy Rao and Hall, 2003.	Besoins en résidus agricoles $10 \times 0,6 = 6 \text{ kg de MS/animal/jour}$
Période de l'année où les résidus sont consommés	On considère une période d'alimentation à base de résidus de 250 jours/an.	Le reste du temps les animaux ont accès aux pâturages ou aux fourrages verts (paragraphe 1.4)	Besoins annuels en résidus agricoles $6 \times 250 = 1500 \text{ kg/animal/an}$
Calcul des besoins pour l'alimentation	$196 \text{ millions d'animaux} \times 1500 \text{ kg/animal/an}$ = 294 millions de tonnes de résidus (secs) pour assurer l'alimentation animale		

Tableau 9: Hypothèses et calcul des quantités de résidus nécessaires pour assurer l'alimentation animale

3. La disponibilité des résidus agricoles en Inde

3.1. Estimation de la disponibilité brute des résidus agricoles en Inde

La disponibilité brute ou potentiel technique brut (PTB) des résidus agricoles correspond à la quantité totale de résidus générés par les cultures prises en compte.

Nous prenons en compte les résidus primaires et secondaires des principales cultures indiennes et nous calculons le PTB à partir des données de production annuelle et des Ratios Résidus sur Produit principal (RRP). Le tableau 10 synthétise ces données :

Culture	Production de la culture associée (milliers de tonnes) ⁵	RRP ⁶	PTB (milliers de tonnes)
Paille de riz	90.560	1,5	135.840
Paille de blé	72.822	1,5	109.233
Tiges de maïs	15.583	2	31.166
Tiges de coton	8.723 milliers d'hectares	3,5t/ha	30.530
Feuilles/bouts blancs	290.998	0,1	29.099
Tiges de mils	11.795	1,8	21.231
Tiges d'arachide	7.397	2,2	16.273
Tiges de moutarde et colza	7.076	1,8	12.736
Tiges de sorgho	7.317	1,7	12.438
Tiges de soja	8.557	1,35	11.551
Tiges de pois d'Angole	2.564	3,8	9.743
Feuilles de cocotier	1.902 milliers d'hectares	4 t/ha	7.608
Tiges de pois-chiche	5.810	1,3	7.553
Tiges d'autres légumineuses	5.736	1,3	7.456
Tiges de tournesol	1.249	2	2.498
Total résidus primaires		444.960	
Bagasse	290.998	0,3	87.299
Balle de riz	90.560	0,2	18.112
Enveloppe de coton	8.259	1,1	9.084
Coïr de noix de coco	1.902 milliers d'hectares	2,5 t/ha	4.755
Epis de maïs	15.583	0,3	4.674
Coques de noix de coco	1.902 milliers d'hectares	1 t/ha	1.902
Coques d'arachide	7.397	0,2	1.479
Total résidus secondaires		127.307	
Total résidus		572.267	

Ce sont 572 millions de tonnes de résidus qui sont générés chaque année par les principales cultures indiennes. Les résidus primaires sont majoritaires en termes de quantité (78% du total). Les pailles de riz, de blé et la bagasse sont les principaux résidus générés en Inde (58% du volume total de résidus générés).

3.2. Estimation de la disponibilité en tenant compte des usages agricoles

Les quantités de résidus générés (PTB) en Inde sont importantes, elles représentent 11% du PTB mondial estimé par Milhau et Fallot (2010).

⁵ Les données de production correspondent à la moyenne 2005-2010, d'après le gouvernement indien (GOI,2010)

⁶ Les RRP retenus sont issus de la bibliographie indienne (Murali, 2007 ; Ravindranath et al. 2005 ; Singh et Gu, 2009)

Nous allons à présent analyser la disponibilité des résidus en tenant compte des besoins agricoles estimés dans la partie 2.

- Les besoins en matière de conservation des sols sont compris dans un intervalle allant de 50% à 100% des résidus générés selon la culture (tableaux 6 et 7).
- Les besoins en matière d'alimentation animale sont évalués à 294 millions de tonnes par an (tableau 9) soit 51% du PTB.

Il en résulte que la disponibilité des résidus agricoles, une fois les besoins agricoles satisfaits, serait nulle.

4. Conclusions et discussion

Nous avons analysé les besoins des sols et de l'élevage en matière de résidus agricoles à l'aide d'une approche agronomique. Les résultats font apparaître que si les résidus générés sont prioritairement destinés à l'agriculture, alors il n'y a pas de résidus disponibles pour la production d'énergie.

La validité des résultats est limitée par:

- L'échelle de l'étude: elle a été menée à l'échelle de l'Inde et ne prétend pas rendre compte de situations plus locales. En effet les besoins en résidus sont variables d'une parcelle à l'autre, d'un élevage à l'autre et impliquent des conclusions différentes.
- L'approche agronomique simplifiée: notre approche permet d'explorer de manière théorique les besoins agricoles mais elle ne tient pas compte des multiples interactions entre les pratiques locales, la saisonnalité, la composition chimique des résidus. Ainsi des pratiques compensatoires (hachage des résidus pour en augmenter le taux de couverture au sol, implantation d'une inter-culture, fumure des sols...) pourraient réduire les besoins des sols et améliorer la disponibilité. En ce qui concerne la saisonnalité, une culture récoltée avant la saison des pluies et dont les résidus protégeront le sol n'implique pas la même disponibilité qu'une culture récoltée avant la saison sèche.

Bibliographie

- Andrews S. (2006). Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. White Paper. Leader, Soil Quality National Technology Development Team USDA-National Resource Conservation Service. 15p.
- Birthal, P.S., Kumar, A., Ravishankar, A. and Pandey, U.K. (1999). Sources of growth in the livestock sector. Policy Paper 9, National Centre for Agricultural Economics and Policy Research, New Delhi.
- Birthal, P. and Parthasarathy Rao, P. (2002). *Technology options for sustainable livestock production in India*. Proceedings of the Workshop on Documentation, Adoption, and Impact of Livestock Technologies in India, 18–19 Jan 2001, ICRISAT, National Centre for Agricultural Economics and Policy Research and International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 220 pp.
- Blanco-Canqui H., Lal R. (2007). Soil and crop response to harvesting crop residues. *Geoderma*. 141, 355-362
- Bussiere M. (1996) - L'érosion des sols cultivés en France: manifestation, coûts, remèdes. Mém. D.E.S.S., Univ. Picardie Jules Verne, 136 p.
- Chand R. et Raju S.S. (2008). Livestock Sector Composition and Factors affecting its growth. *Indian Journal of Agricultural Economics*. 63(2): 198-208
- Clapp, C.E., Selmares, R.R., Layese, M.F., Linden, D.R., Dowdy, R.H., (2000) Soil organic carbon and ¹³C abundances as related to tillage crop residue and N fertilizer under continuous corn management in Minnesota. *Soil Tillage and Research* 55, 127–142.
- Devendra C., Thomas D., Jabbar M. and Zerbin E. (2000). Improvement of livestock production in crop animal systems in agro-ecological zones of South Asia. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute. 117 pp.
- Erenstein O., Thorpe W., Singh J. and Varma A. (2007). Crop-livestock interactions and livelihoods in the Indo-Gangetic Plains, India: A Regional Synthesis. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- FAO (2005) Fertilizer use by crop in India <http://www.fao.org/docrep/009/a0257e/A0257E00.htm#TOC>
- FAO (2004) Étude de cas 11. Foin et résidus de récoltes en Inde et au Népal - La situation en Inde in Conservation du foin et de la paille pour les petits paysans et les pasteurs, par J.M. Suttie. Éditeur: FAO. Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'Agriculture. AGP. Division de la production végétale et de la protection des plantes. Rome. Italie. 317p.
- Govinda rajan, S.V., and Gopala Rao, H.G (1978) Studies on soils of India, Vikas, New delhi
- Harrold, L.; Edwards, W. M. (1969) A severe rainstorm test of no till corn. *J. Soil Water Conserv.* 27 (30), 36.
- Husain M. (2008) *Geography of India*. New Delhi. India. Tata McGraw-Hill.
- Karlen D.L., Lal R., Follett R.F., Kimble J.M., Hatfield J.L., Miranowski J.M., Cambardella C.A., Manale A., Anex R.P., Rice C.W. (2009) Crop Residues: The rest of the story. *Environmental Science & Technology*. 43: 8011-8015
- Kelley T.G., Parthasarathy Rao P. and Walker T.S. (1993). The relative value of cereal straw fodder in India: Implications for cereal breeding programs at ICRISAT. Pages 88–105 in *Social science research for agricultural technology development: Spatial and temporal dimensions* (Dvorak K, ed.). London, UK: Centre for Agriculture and Biosciences International.
- Kelley T.G. and Parthasarathy Rao P. (1996). Availability and requirement of different sources of livestock feed in India with special reference to sorghum and millet straw. Pages 53–65 in *Global agenda for livestock*

research: Proceedings of the consultation for the South Asia region, 6–8 Jun 1995, ICRISAT, Patancheru, Andhra Pradesh, India (Devendra C and Gardiner P, eds.). Patancheru 502 324, Andhra Pradesh, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

Kothyari, U. C. Wailing, D. E. and Webb, B. W. (eds) (1996) Erosion and sedimentation problems in India.. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* , (Proc. Exeter Symp., July 1996) . pp. 531-540. — IAHS Publ. no. 236 http://iahs.info/redbooks/a236/iahs_236_0531.pdf

Kumar A. et Singh D.K. (2008). Livestock Production Systems in India: An Appraisal Across Agro-Ecological Regions. *Indian Journal of Agricultural Economics*. 63(4): 577-597

Lal R. (2009) Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production. *Soil and Tillage Research*. 102: 233-241

Lal R. (2007) Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management* 28: 747–758

Lal, R., 2006. Enhancing crop yield in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation and Development* 17, 197–209.

Lal R. (2005) World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International* 31: 575-584.

Lal, R., 1976. Soil Erosion Problems on Alfisols in Western Nigeria and Their Control, IITA Monograph 1, Ibadan, Nigeria, p. 208

Milhau A. et Fallot (2010). Estimation globale de la disponibilité des résidus agricoles dans le monde et de leur valorisation énergétique. 27 pages. Non publié.

McCarthy, J. r., D. L. Pfoest and H. D. Currence. 1993. Conservation tillage and residue management to reduce soil erosion. Agricultural Publication G1650, University Extension University of Missouri-Columbia. Columbia MO. <http://extension.missouri.edu/publications/DisplayPub.aspx?P=G1650>

Morris, G. L. (1995) Reservoir sedimentation and sustainable development in India. In: Proc. Sixth Int. Symp. on River Sedimentation (New Delhi, India), 57-61.

Motsara, M.R. (2002). Available nitrogen, phosphorus and potassium status of Indian soils as depicted by soil fertiliser maps. *Fert. News*, 47(8): 15–21.

Milbrandt A. 2005 A geographic perspective on the current biomass resource availability in the united states. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, NREL/TP-560-3981. <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39181.pdf>

Murali S., Rajnish Shrivastava and Mohini Saxena (2007). Quantification of agricultural residues for energy generation - A case study. In: *Journal of the IPHE*, 2007-2008 (3)

Mukhopadhyay K, Seal A, Bera R and Bhattacharyya P. (2006) Comparative study of erodibility factor in different agro-ecological sub-regions of eastern India. *Archives of Agronomy and Soil Science* 52(3):281-287.

Narayana, D. & Ram Babu (1983) Estimation of soil erosion from India. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 109(4), 419-434.

Nelson R.G., Walsh M., Sheehan J.J., Graham R. (2004). Methodology for estimating removable quantities of agricultural residues for bioenergy and bioproduct use. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol. 113-116: *Biotechnology for fuels and chemicals*. Spring 2004. Eds Humana Press.

Pal I. (2009) Rainfall Trends in India and Their Impact on Soil Erosion and Land Management. PhD Thesis. Department of Engineering. University of Cambridge

Parthasarathy Rao P. and Birtal P.S. (2008). *Livestock in mixed farming systems in South Asia*. National Centre for Agricultural Economics and Policy Research, New Delhi, India; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, 502324, Andhra Pradesh, India. 156 pp. <http://mahider.ilri.org/bitstream/10568/400/2/Livestockinmixedfarming-ICRISAT.pdf>

Parthasarathy Rao P. and Hall A. (2003). Importance of crop residues in crop-livestock systems in India and farmers' perceptions of fodder quality in coarse cereals. *Fields Crop Research* 84: 189–198.

Sere C, and Steinfeld H. (1996). *World livestock production systems: Current status, issues and trends*. FAO Animal Production and Health Paper 127. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Petrolia, D. R. (2008) An Analysis of the Relationship between Demand for Corn Stover as an Ethanol Feedstock and Soil Erosion. *Rev. Agric. Econ.* 30 (4), 677–691.

Pimentel, D., 2006. Environmental energetic and economic comparison of organic and conventional farming systems. *Bioscience* 55,573–582.

Ravindranatha N.H., Somashekara H.I., Nagarajaa M.S., Sudhaa P., Sangeethaa G., Bhattacharyab S.C. and Abdul Salamb P. (2005) Assessment of sustainable non-plantation biomass resources potential for energy in India. In *Biomass & energy*, 29 (2005), pp. 178-190

Sarkar A.. (1997) Energy-use patterns in sub-tropical rice-wheat cropping under short term application of crop residue and fertilizer. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 61: 59-67

Shangle, A. K. (1991) Hydrographie surveys of Indian reservoirs. In: *Course Material for Workshop on Reservoir Sedimentation*, sponsored by IRTCES, China, and UNESCO (New Delhi, India), 2.9.1-2.9.16.

Samra, Jagir S., Bijay Singh and Kuldeep Kumar. 2003. *Managing Crop Residues in the Rice-Wheat System of the Indo-Gangetic Plain*. In J.K. Ladha, J.E. Hill, R.J. Buresh, J.M. Duxbury and R.K. Gupta (eds.). *Improving The Productivity And Sustainability Of Rice-Wheat Systems: Issues And Impacts*. ASA Special Publication 65. Madison, WI: American Society of Agronomy. Pp. 173-95.

Singh J. et Gu S. (2010) Biomass conversion to energy in India - A critique. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1367–1378

Singh, Yadvinder, Bijay Singh and J. Timsina. 2005. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. *Advances in Agronomy* 85: 269-407.

Singh G., Babu R., Narain P., Bhushan L.S., Abrol I.P. (1992). Soil erosion rates in India. *Journal of Soil and Water Conservation* 47 (1): 97-99.

SWCS (2008). *Beyond T: Guiding Sustainable Soil Management*. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.

USDA-NRCS. *National Agronomy Manual*. 3rd Edition. October 2002. <http://www.info.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17894.wba>

Wilhelm, W.W., Johnson, J.M.F., Hatfield, J.L., Voorhees, W.B., Linden, D.R. (2004) Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agronomy Journal* 96, 1–17.

Wilson, G.V., Dabney, S.M., McGregor, K.C., Barkoll, B.D., 2004. Tillage and residue effects on runoff and erosion dynamics. *Trans. ASAE* 47, 119–128.