

UNIVERSITE DU BURUNDI



Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie
Département des Sciences Agro-Environnementales (SAE)
Baccalauréat III

Evaluation de l'aptitude des terres

NOTES DE COURS

Par

Prof. Dr Ir Séverin Nijimbere

Année académique 2024 - 2025

Descriptif du cours

Cours : SAE 3662– Evaluation de l’aptitude des terres; 3 crédits

PROCESSUS	PARAMETRES	DESCRIPTION
Elaboration	Thème	Evaluation de l’aptitude des terres
	Objectif général	Comprendre la procédure d’évaluation et de classement de l’aptitude des terres selon des modes d’exploitation précis
	Pré-requis	Avoir étudié la chimie, mathématique, pédologie et classification des sols et remplir les conditions d’admission au Bac III
	Objectifs spécifiques	<p>A la fin du cours, l’étudiant sera capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comprendre le comportement d’une terre soumise à une utilisation donnée en tenant compte du climat, des sols et de la végétation. • Évaluer et classer les terres en fonction de modes d'utilisation précis, comme l'agriculture, l'élevage ou la foresterie. • Faciliter la prise de décision sur la planification et l'aménagement du territoire en fournissant les informations nécessaires • Émettre des recommandations claires sur les types d'utilisation des terres les plus adaptés, leurs conséquences possibles, et les améliorations ou intrants nécessaires.
	Conditions générales	Salle de cours bien sonorisée et vidéoprojecteur
	Bref contenu du cours	<ol style="list-style-type: none"> 1. Introduction et principes de base d’une évaluation de l’aptitude d’une terres 2. Les étapes clés de l’évaluation de l’aptitude des terres 3. Les facteurs clés de l’évaluation de l’aptitude d’une terre (qualités de terres et caractéristiques des terres, exigences des utilisations des terres, facteurs climatiques, facteurs édaphiques, facteurs topographiques,) 4. La classification de l'aptitude d’une terre (système FAO, Classification des aptitudes des terres de l’USBR, Classification de l’irrigabilité des terres, Approche quantitative d’évaluation de l’aptitude des terres) 5. Les Aspects socio-économiques de l’évaluation de l’aptitude des terres 6. Présentation des résultats d’une évaluation de l’aptitude d’une terre
	Références bibliographiques	<ul style="list-style-type: none"> - Tessens, E 1991. Une méthode d’évaluer l’aptitude des terres au Burundi, Publication ISABU n° 156. 74 pages - FAO, 1976. Cadre pour évaluation des terres, Bulletin pédologique n°32. ISBN 92-5-200111-5, Rome, 195 pages - FAO 1988. Directives: évaluation des terres pour l’agriculture pluviale. Bulletin pédologique n°52 - FAO 1989. Evaluation des terres pour l’agriculture irriguée directives, Bulletin pédologique n°55

PROCESSUS	PARAMETRES	DESCRIPTION
	Informations	Notes de cours et rapport des TP
	Activités	Travaux pratiques et exercices
Intervention	Déroulement	Cours magistral, TP et TD
	Productions	Rapport des travaux pratiques
	Motivation	Le cours contient des aspects pratiques qui peuvent intéresser les étudiants dans la vie courante.
	Interactions	Echanges avec les étudiants pendant l'exposé théorique et les TP
Approbation	Evaluation	Examen écrit (60%) et rapport des travaux dirigés et exercices en classe (40%)

Contenu du cours

Chapitre 1. Introduction et principes de base.....	1
1.0. Introduction générale.....	1
1.1. Définitions.....	1
1.2. Objectifs de l'évaluation de l'aptitude des terres.....	1
1.3. Principes de l'EAT.....	3
Chapitre 2. Les étapes clés de l'EAT:	4
2.1. Définition des utilisations des terres:	4
2.2. Description des unités cartographiques et des qualités des terres.....	6
2.3. Comparaison entre les terres et leur utilisation	7
2.4. Analyse socio-économique	7
2.5. Classification d'aptitude (qualitative et quantitative).....	7
2.5.1. Classification qualitative	7
2.5.2. Classification quantitative	8
2.5.1. Structure de la classification.....	8
Chapitre 3. Les facteurs clés de l'EAT:.....	9
3.1. Qualité de terres et caractéristiques des terres	9
3.1.1. Liste des qualités des terres.....	10
3.1.1.1. Qualités des sols sous l'angle de la production de cultures ou autres formes de croissance végétale.....	10
3.1.1.2. Qualités des terres sous l'angle de la production d'animaux domestiques.....	12
3.1.1.3. Qualités des terres sous l'angle de la sylviculture.....	12
3.1.1.4. Qualités des terres sous l'angle de l'aménagement et des biens de production.....	13
3.1.2. Liste des caractéristiques des terres.....	13
3.1.3. Défauts de certains sols agricoles.....	18
3.1.3.1. Principales contraintes à la production agricole	18
3.1.3.2. Quelques niveaux d'appréciation de la qualité du sol agricole par rapport aux facteurs limitants.....	19
3.2. Exigences des utilisations des terres:	22
3.3. Facteurs climatiques:.....	23
3.4. Facteurs édaphiques:	24
3.4.1. Facteurs physiques.....	24
3.4.2. Facteurs chimiques	25

3.4.3. Facteurs biologiques	26
3.5. Facteurs topographiques.....	26
3.5.1. Les facteurs.....	26
3.5.2. Prise en compte de la topographie dans la prise de décision.....	27
Chapitre 4. La classification de l'aptitude d'une terre	29
4.1. Le système de classification de la FAO	29
4.2. Autres systèmes de classification.....	31
4.2.1. Classification des aptitudes des terres de l'USBR.....	32
4.2.2. Classification de l'irrigabilité des terres (CIT)	34
4.2.3. Approche quantitative d'évaluation de l'aptitude des terres	35
4.2.3.1. Indice Storie	35
4.2.3.2. Évaluation de la productivité.	36
Chapitre 5. Les Aspects socio-économiques	37
5.1. Introduction	37
5.2 Unités de mesure de l'aptitude	37
5.3. Analyse économique et financière	38
5.4. Considérations économiques et sociales générales	38
5.5. Analyse coûts-bénéfices	40
5.6. Impacts sociaux du projet	41
5.7. Intégration des aspects sociaux dans le processus d'évaluation.....	42
Chapitre 6. Présentation des Résultats:	43
6.1. Contenu des résultats.....	43
6.2. Objectif de la présentation.....	43
6.3. Exemple de table de matière du rapport d'EAT.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46

Chapitre 1. Introduction et principes de base

1.0. Introduction générale

L'un des objectifs des études agronomiques est la compréhension des facteurs de production agricole et des moyens de leur optimisation en vue de l'augmentation des rendements. Les facteurs de production agricoles incluent les facteurs abiotiques (sol et climat), les facteurs biotiques (semences, maladies et ravageurs) et les facteurs technologiques.

Les facteurs environnementaux abiotiques et biotiques d'une terre donnée ne conviennent jamais à toutes les cultures ou à toutes les utilisations voulues. Certaines terres conviennent à une gamme d'utilisations alors que d'autres terres conviennent aux autres utilisations.

Avant d'entreprendre des actions de mise en valeur d'une terre pour une culture donnée, il conviendrait de procéder préalablement à l'évaluation de l'aptitude de ladite terre pour la spéculation voulue.

1.1. Définitions

Dans les *Bulletins pédologiques de la FAO* (n°32 de 1976, n° 52 de 1988 et n° 53 de 1989), le concept de terre est compris comme un ensemble complexe constitué par le sol, le climat, les formes de relief, l'hydrologie, la végétation et la faune ainsi que la localisation.

Pour un pédologue, **une terre** signifie l'ensemble formé par le sol, le climat, la topographie, l'hydrologie, la végétation et l'environnement socio-économique.

L'évaluation de l'aptitude des terres est l'évaluation de leur adéquation à des utilisations spécifiques, en tenant compte de leurs qualités et des exigences de ces utilisations.

C'est une démarche qui consiste à estimer la réponse des terres à des utilisations données. Elle permet de décider rationnellement des modes d'utilisation des terres, à partir d'une analyse des relations existant entre les terres et leurs diverses utilisations qui donne une approximation des besoins en intrants et de la production attendue.

1.2. Objectifs de l'évaluation de l'aptitude des terres

L'évaluation de l'aptitude des terres (EAT) a pour principal objet de choisir la meilleure utilisation possible pour chaque unité de terre, compte tenu de considérations à la fois physiques et socio-économiques ainsi que de la nécessité de conserver, pour l'avenir, les ressources naturelles.

Les objectifs plus précis varient de façon considérable selon le but et l'échelle que l'on donne à l'évaluation. Cependant, au terme de chaque évaluation, il faudra avoir répondu aux questions suivantes :

- Comment la terre est-elle actuellement gérée et qu'advient-il si les pratiques actuelles restent inchangées ?
- Quelles sont les améliorations que l'on pourrait apporter aux pratiques d'aménagement, sans modifier l'utilisation actuelle ?
- Quels autres modes d'utilisation sont physiquement possibles et économiquement et socialement désirables ?
- Quels sont ceux qui offrent des possibilités de production continue ou autres avantages ?
- Quels sont les effets nuisibles, du point de vue physique, économique ou social, liés à chaque mode d'utilisation ?
- Quels sont les intrants renouvelables nécessaires pour obtenir la production souhaitée et minimiser le plus possible les effets nuisibles ?
- Quels sont les avantages présentés par chaque mode d'utilisation (produits, services ou autres avantages) ?

Si l'introduction d'un nouveau type d'utilisation suppose une modification profonde de la terre elle-même, par exemple des programmes de conservation ou de drainage, l'évaluation doit en outre répondre aux questions ci-après:

- Quelles modifications peut-on et faut-il apporter à l'état de la terre, et de quelle manière peut-on y parvenir ?
- Quels sont les intrants non renouvelables qu'exigent ces modifications ?

L'évaluation, en elle-même, ne détermine pas les changements d'utilisation qu'il faut effectuer; elle ne fait que fournir des données à partir desquelles les décisions seront prises. Une évaluation qui se veut efficace doit normalement proposer au moins deux formes d'utilisation possibles pour chaque superficie considérée et mentionner également les conséquences bénéfiques et nuisibles de chacune de ces possibilités.

1.3. Principes de l'EAT

Ces principes de base de l'EAT tels que définis par le cadre d'Evaluation des terres de la FAO (1796) sont les suivants :

- a) L'aptitude d'une terre n'a de sens qu'en fonction d'une utilisation spécifique ; il est donc erroné de parler d'une aptitude générale pour l'agriculture, puisqu'une terre peut être apte pour une culture et inapte pour une autre.
- b) Par aptitude, on entend une utilisation continue sans dégradation excessive ;
- c) Les différents types d'utilisation doivent se comparer à partir d'une base économique simple, c'est -à- dire que l'aptitude est évaluée en comparant la valeur de la production et son coût ;
- d) Des décisions de gestions, d'investissements, etc. ne devront pas être basées uniquement sur les résultats d'une évaluation agricole ; des facteurs socio-économiques peuvent imposer ou éliminer certaines spéculations.

L'EAT doit être systématique, tenir compte des aspects physiques, économiques et sociaux, et être adaptée à des utilisations spécifiques.

Chapitre 2. Les étapes clés de l'EAT:

L'EAT implique des études de base sur le climat, le relief, les sols et la végétation, ainsi que l'analyse des exigences des utilisations envisagées.

D'après la FAO (1976), l'évaluation des terres comporte généralement les grandes activités ci-après:

- Consultations initiales sur les objectifs de l'évaluation et sur les données et hypothèses sur lesquelles elle sera fondée.
- Description des catégories d'utilisation des terres envisagées et de leurs exigences.
- Description des unités cartographiques des terres et extrapolation de leurs qualités.
- Comparaison entre les terres et leur utilisation.
- Analyse socio-économique.
- Classification d'aptitude (qualitative et quantitative).
- Présentation des résultats.

2.1. Définition des utilisations des terres:

La définition des utilisations des terres consiste à identifier les différentes options d'utilisation des terres possibles dans la zone étudiée (agriculture, foresterie, élevage, etc.).

Les types d'utilisation des terres (*Land utilisation Types*, T.U.T ou LUT ») pour l'agriculture sont caractérisés par la spéculatation retenue (ou les cultures, les associations ou les rotations) et par les conditions générales de l'exploitation agricole. Ainsi, les caractéristiques suivantes font partie d'une description d'un TUT:

- La production (donnée essentielle)
- L'orientation du marché
- Le coefficient de capital
- Le coefficient de main-œuvre
- Les sources d'énergie
- Les connaissances techniques et l'attitude des paysans ;
- Les techniques employées
- Les infrastructures nécessaires ;
- La taille et la configuration des propriétés foncières

- Le régime foncier ;
- Le niveau des revenus

Les facteurs, outre que la production, sont souvent résumés et comprimés dans le « niveau d'inputs » (par exemple maïs, faible niveau d'inputs ; pomme de terre, niveau élevé d'inputs). Ceci est une façon de distinguer les grands types d'utilisation sans devoir détailler chaque caractéristique. Le tableau 2.1. les reprend avec une certaine précision.

En général, les exploitations familiales typiques du Burundi montrent des qualités des niveaux « faible » et intermédiaire mais sont en évolution vers un niveau intermédiaire, sauf pour l'accessibilité de crédit rural.

Tableau 2.1. Les caractéristiques des trois types majeurs d'utilisation des terres dans des conditions d'agriculture pluviale

Caractéristique	Faible niveau d'inputs	Niveau intermédiaire d'inputs	Niveau élevé d'inputs
Production	Cultures de : agrumes, ananas, arachide, avocatier, banane, blé, caféier arabica, caféier robusta, canne à sucre, carotte, chou, colocase, coton, haricot sec, igname, maïs, manguier, manioc, oignon, palmier à huile, papaye, pastèque, patate douce, petit pois, poivron, pomme de terre, quinquina, riz de bas-fonds, riz irrigué, riz strictement pluvial, sisal, soja, sorgho, théier, tomate, tournesol, triticale		
Orientation du marché	Production de subsistance	Production de subsistance avec vente du surplus	Production commerciale
Coefficient de capital	Faible	Intermédiaire ; crédit accessible	Elevé
Coefficient de main d'œuvre	Elevé, y compris la main d'œuvre familiale		Faible. Main d'œuvre familiale rémunérée si utilisée
Source d'énergie	Travail manuel (outils à main)	Travail manuel à outils à main et/ou traction animale à accessoires améliorés	Mécanisation complète (y compris les opérations de récolte)
Technologie employée	Cultivars locaux. Application d'engrais et de mesures phytosanitaires nulle Période de jachère. Pas de LAE	Cultivars améliorés si disponibles. Application d'engrais insuffisante. Quelques mesures phytosanitaires simples. Périodes de jachère réduites. Pas de LAE	Cultivars à haut rendement. Application d'engrais, de produits chimiques contre les ravageurs, les maladies et les mauvaises herbes. Pas de jachère. LAE présente

Caractéristique	Faible niveau d'inputs	Niveau intermédiaire d'inputs	Niveau élevé d'inputs
Infrastructures nécessaires	Accès au marché pas essentiel ; encadrement inadéquat	Accès au marché nécessaire ; encadrement actif y compris des champs de démonstration	Accès au marché indispensable ; encadrement et application de résultats de recherche adéquate.
Propriétés foncières	Petites, parfois morcelées	Petites ; parfois morcelées	Grandes et remembrées
Niveau des revenus	Faible	Modéré	Elevé

2.2. Description des unités cartographiques et des qualités des terres

Une **unité de terre** est une superficie de terre, généralement cartographiée, dotée de caractéristiques bien définies qui servent de base à l'évaluation des terres.

La plupart des études d'évaluation exigent la prospection des ressources physiques, encore que, de temps à autre, les informations déjà disponibles sont suffisantes. Les études comprennent souvent des enquêtes pédologiques sur les sols ou leurs formes de relief, parfois, sur les ressources en pâturages, ou autres ressources écologiques, des inventaires forestiers, la prospection des eaux superficielles et souterraines, ou encore des études de techniques routières, tout cela aux fins de définir les limites des unités cartographiques des terres, ainsi que leurs qualités.

Le tracé des unités cartographiques est fondé en partie sur les caractéristiques les plus faciles à cartographier, qui sont souvent les formes de relief, les sols et la végétation. Toutefois, à l'étape de la prospection des ressources, on identifie déjà provisoirement les qualités des terres pouvant influencer de façon significative sur les types d'utilisation envisagés; aussi faut-il s'attacher plus particulièrement aux qualités pendant les enquêtes sur le terrain. Dans les enquêtes en vue de projets d'irrigation, par exemple, on examinera, notamment, les propriétés physiques du sol, la qualité et la quantité d'eau disponible et les conditions topographiques en fonction des méthodes d'irrigation que l'on prévoit.

Chaque unité cartographique doit être caractérisée quant aux qualités relatives à l'utilisation envisagée. Ces qualités sont précisées plus loin.

2.3. Comparaison entre les terres et leur utilisation

Dans chaque unité cartographique, les caractéristiques pédologiques, climatiques, topographiques et socio-économiques sont reliées aux qualités des terres qui influent directement sur le type d'utilisation envisagée. Il s'agira de confronter les exigences du TUT aux caractéristiques de la terre ou à ses qualités vis-à-vis de l'utilisation.

2.4. Analyse socio-économique

L'analyse socio-économique évalue les coûts et les bénéfices de chaque utilisation et prend en compte les aspects sociaux. Elle évalue aussi les implications économiques et sociales des utilisations proposées pour les terres, en considérant des facteurs comme la viabilité financière des projets, la création d'emplois, le développement régional et la distribution des revenus. Elle complète l'analyse physique, évaluant le rendement potentiel des cultures ou autres activités, les coûts des intrants, la production et la rentabilité globale, afin de permettre une prise de décision rationnelle et durable.

2.5. Classification d'aptitude (qualitative et quantitative).

La classification d'aptitude des terres, aussi appelée « adéquation des terres », évalue la capacité intrinsèque d'une parcelle à une utilisation spécifique, en se basant sur des critères qualitatifs (propriétés biophysiques) ou quantitatifs (coûts, bénéfices). L'approche qualitative utilise des facteurs tels que la topographie, le climat et les caractéristiques du sol, tandis que l'approche quantitative intègre des données économiques comme la marge brute d'exploitation par hectare. Les résultats de ces évaluations permettent de catégoriser les terres en différents ordres (très apte, moyennement apte, marginalement apte, inapte) et sous-classes, en fonction des limitations et des améliorations nécessaires pour leur mise en valeur.

2.5.1. Classification qualitative

Cette méthode se concentre sur les propriétés physiques et naturelles de la terre qui influencent sa productivité et sa sensibilité.

Critères:

- **Propriétés biophysiques:** Le climat, les propriétés du sol (pédologie), le relief (topographie) et les caractéristiques de la végétation sont des éléments clés.
- **Potentiel productif:** L'aptitude à produire des cultures ou d'autres biens est évaluée en fonction de ces critères.
- **Sensibilité:** L'impact de certaines utilisations sur le terrain est pris en compte.

Exemple de catégories:

- **Très fort/Très apte:** Idéal pour l'agriculture.
- **Modérément fort/Moyennement apte:** Conditions intermédiaires.
- **Faible/Marginalement apte:** Utilisations limitées ou nécessitant des améliorations importantes.

2.5.2. Classification quantitative

Cette approche évalue l'aptitude des terres sur la base de critères économiques et financiers.

Critères:

- **Marge brute d'exploitation:** Mesure la rentabilité d'une terre en fonction des bénéfices et des coûts, souvent exprimée en unité monétaire par hectare.
- **Coût d'opportunité:** Analyse la valeur des bénéfices perdus en utilisant la terre pour une activité plutôt qu'une autre.
- **Valeur par volume d'eau:** Pour les projets d'irrigation, on peut évaluer l'aptitude en termes de valeur économique par mètre cube d'eau apportée par hectare.

Exemple de catégories:

- **Très apte:** Rentabilité élevée.
- **Moyennement apte:** Rentabilité modérée.
- **Marginalement apte:** Rentabilité faible.
- **Actuellement inapte:** Pas assez rentable pour justifier l'effort.

2.5.1. Structure de la classification

Ces deux types d'évaluation peuvent être intégrés dans un système hiérarchique de classification comprenant les ordres d'aptitude, les classes d'aptitude, les sous-classes d'aptitude et les unités d'aptitude.

L'ordre d'aptitude des terres indique les types généraux d'aptitude (apte ou non apte).

La classe d'aptitude des terres permet de différencier les degrés d'aptitude à l'intérieur d'un ordre (ex: S1, S2 pour les terres très et moyennement aptes).

Sous-classe d'aptitude des terres décrit les limitations ou les principales améliorations nécessaires à l'intérieur d'une classe (ex: besoin d'irrigation, risque d'érosion).

Unité d'aptitude des terres représente des différences mineures d'aménagement à l'intérieur d'une sous-classe.

Chapitre 3. Les facteurs clés de l'EAT:

3.1. Qualité de terres et caractéristiques des terres

Une qualité de la terre est une propriété de la terre qui influe de façon particulière sur l'aptitude d'une terre à un mode d'utilisation donné. Parmi les qualités de terre qui jouent un rôle dans l'agriculture pluviale, on peut citer: le régime thermique, la disponibilité en eau, le drainage, les apports d'éléments nutritifs, les conditions d'enracinement, les possibilités de mécanisation et les risques d'érosion.

Une caractéristique de la terre est une propriété de la terre qu'on peut mesurer ou évaluer. Elle peut servir à différencier des unités de terre présentant diverses aptitudes et est un moyen de décrire les qualités des terres. On peut trouver comme exemple de caractéristiques des terres: les précipitations annuelles moyennes, le degré de pente, la classe de drainage du sol, la profondeur effective, la texture du sol superficiel, la capacité en eau utile du sol, le pH et le pourcentage d'azote du sol.

Les qualités des terres sont des propriétés de la terre, mais ce qui fait leur caractère essentiel est qu'elles influent sur l'utilisation de la terre d'une manière particulière ; c'est-à-dire que la qualité de la terre sera évaluée par rapport à son utilisation. Si c'est une utilisation agricole, on tiendra aussi compte de l'espèce végétale et/ou de la variété à cultiver, puisque toutes les variétés n'exigent pas les mêmes conditions pour leurs croissances, certaines exigeant une grande quantité d'eau par exemple que d'autres, certaines autres demandant des terres plus profondes que d'autres.

De nombreuses caractéristiques des terres influent sur l'aptitude de plusieurs façons différentes, et influent donc sur plusieurs qualités des terres (voir tableau 3.1). C'est le cas, par exemple, de la « texture du sol » qui a des effets directs et indirects sur quelque quatorze qualités des terres, notamment sur la disponibilité en eau, la capacité de rétention des éléments nutritifs, la facilité de travail du sol et les risques d'érosion. Il est donc impossible de dire qu'une texture particulière est « bonne » ou ne présente « aucune limitation »; des textures sableuses sont favorables dans le sens où elles facilitent le travail du sol; par contre, elles influent négativement sur la disponibilité en eau et la capacité de rétention des éléments nutritifs. L'effet défavorable sur la disponibilité en eau

peut ne pas être grave dans des zones où les précipitations sont plus que suffisantes pour les cultures envisagées, mais devient important là où il y a risque de sécheresse.

Les qualités des terres mettent l'accent sur la façon dont la terre influe sur l'aptitude à une utilisation: disponibilité en éléments nutritifs, risques d'érosion, possibilités de mécanisation, etc. Par contre, si l'on considère des caractéristiques telles que les précipitations annuelles ou la texture du sol, on peut ne pas très bien savoir quels effets sur les cultures sont considérés. Par exemple, une forte pluviométrie augmente la disponibilité en eau, mais peut diminuer la proportion d'oxygène en saturant le profil du sol à certaines époques de l'année. La profondeur effective du sol est une des principales caractéristiques qui influent sur les conditions d'enracinement, mais dans les zones sujettes à la sécheresse, elle a une importance supplémentaire en raison de son effet sur la disponibilité en eau.

Toutefois, le principal inconvénient des caractéristiques des terres est qu'elles ne tiennent pas compte des interactions qui existent entre différents facteurs: sol, climat et formes du relief. On a noté, qu'une qualité d'une terre peut dépendre d'une combinaison de beaucoup d'éléments (ex : la qualité appelée « disponibilité en eau » dépend d'une combinaison d'éléments : le volume des précipitations, leur répartition sur l'année, la capacité en eau du sol et, dans certains cas, la présence également d'une nappe souterraine proche de la surface ou d'infiltrations). Les facteurs d'environnement que sont le climat, le sol, les formes de relief et l'hydrologie peuvent donc influencer sur la disponibilité en eau).

3.1.1. Liste des qualités des terres

3.1.1.1. Qualités des sols sous l'angle de la production de cultures ou autres formes de croissance végétale

Une liste des qualités des terres qui peuvent influencer sur l'aptitude de la terre à une production pluviale est donnée au tableau 3.2.

Les qualités 1-15 sont liées essentiellement, mais non exclusivement, aux exigences des cultures; les qualités 16-23 sont liées principalement aux conditions d'aménagement, tandis que les qualités 24 et 25 se rapportent aux besoins de conservation. Les numéros qui leur sont attribués n'ont d'autre but que de faciliter les références d'un tableau à l'autre et n'ont pas d'autre signification.

Il ne sera, en aucun cas, nécessaire d'avoir recours à toutes ces qualités pour évaluer l'aptitude des terres d'une région particulière à une culture ou à une gamme de cultures données. Souvent trois ou quatre de ces qualités déterminent la majorité des variations de rendements.

Tableau 3.1. Relation entre les caractéristiques d'une terre et les qualités des terres (Sys et al., 1991)

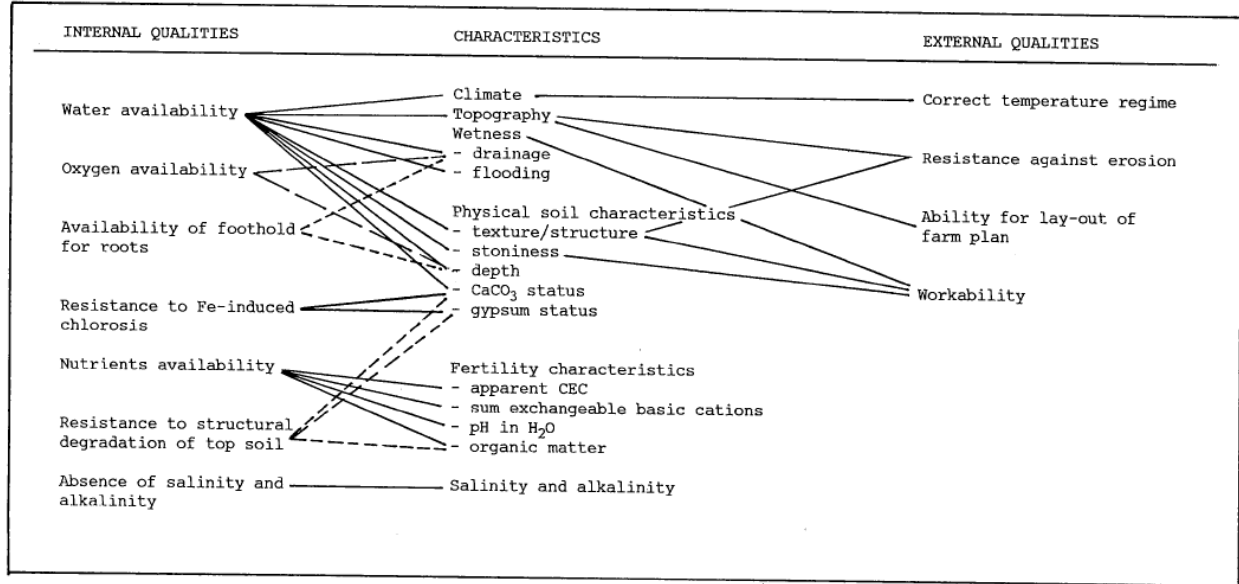


Tableau 3.2. Qualités des terres pour l'agriculture pluviale (FAO, 1988)

Réf N°	Qualités des terres	Subdivision	Caractéristiques indicateurs (voir dans le tableau 1.2)
1	Conditions de rayonnement	- Rayonnement total - Durée du jour	1.1 ; 1.2 ; 1.3 ; 3.13 ; 1.4
2	Régime thermique*		1.1 ; 1.5 ; 2.1 ; 2.2 ; 3.10 ; 3.13
3	Disponibilité en eau*	- Humidité totale - Périodes critiques - Risque de sécheresse	1.7 ; 1.10 ; 1.11 ; 1.12 ; 1.13 ; 1.16 ; 2.3 ; 3.13 ; 4.1 ; 7.4 ; 7.7 ; 8.1
4	Oxygène disponible pour les racines (condition de drainage)		3.3 ; 4.1 ; 4.2 ; 4.3 ; 6.2 ; 6.3 ; 7.2, 7.4 ; 8.3 ; 8.6
5	Disponibilité en éléments nutritifs		6.3 ; 9.1 ; 9.3 ; 9.4 ; 9.5 ; 9.6 ; 9.7 ; 9.8 ; 9.9 ; 9.16(i) ; 10.1 ; 10.2 ; 11.1 ; 11.2
6	Capacité de rétention des éléments nutritifs		6.3 ; 7.4 ; 9.2 ; 9.3 ; 9.4 ; 9.16(ii) ; 10.1 ; 11.2
7	Conditions d'enracinement		6.3 ; 7.4 ; 7.5 ; 7.6 ; 7.7 ; 7.11 ; 8.2
8	Conditions affectant la germination ou l'établissement		1.5 ; 1.7 ; 2.1 ; 7.4 ; 7.5 ; 7.6 ; 7.9
9	Etat hygrométrique de l'air influant sur la croissance		1.14
10	Condition de maturation		1.5 ; 1.7 ; 1.14 ; 3.13
11	Risques d'inondations		4.4 ; 4.5
12	Aléas climatiques	- Gelées - Orages	1.8 ; 1.9 ; 1.15 ; 3.11 ; 3.12
13	Excès de sels	- Salinité - Sodicité	1.5 ; 1.6 ; 1.7 ; 6.3 ; 9.1 ; 9.10 ; 9.11 ; 9.12 ; 9.13 ; 9.16(iii)

14	Toxicité du sol	- Aluminium - Carbonate de calcium - Gypse - Sulfate acide - Divers	6.3 ; 7.8 ; 7.10 ; 9.1 ; 9.14 ; 9.15
15	Ravageurs et maladies	- Ravageurs - Maladies	1.5 ; 1.7 ; 1.14 ; 5.1 ; 7.4 ; 9.1 ; 10.3
16	Facilité de travail du sol		7.3 ; 7.4 ; 7.5 ; 7.6
17	Possibilités de mécanisation		3.2 ; 3.4 ; 3.8 ; 3.9 ; 3.15 ; 7.4
18	Conditions de préparation ou de défrichage de la terre	- Préparation de la terre -Nettoyage de la végétation	3.2 ; 3.8 ; 3.9 ; 3.15 ; 5.1 ; 5.2 ; 5.3
19	Conditions d'entreposage et de transformation		1.5 ; 1.7 ; 1.14 ; 7.4
20	Conditions influant sur le déroulement dans le temps des opérations de production		1.3 ; 1.6 ; 1.12 ; 2.1
21	Circulation à l'intérieur de l'unité de production		3.2 ; 3.5 ; 3.6 ; 3.7 ; 3.15
22	Taille des unités d'aménagement potentielles		3.14 ; 6.4 ; 6.5 ; 7.3
23	Localisation	- Accessibilité actuelle - Accessibilité potentielle	3.2 ; 3.5 ; 3.6 ; 3.7 ; 3.15 ; 12.1
24	Risques d'érosion		1.5 ; 1.7 ; 1.8 ; 1.15 ; 3.1 ; 3.2 ; 3.3 ; 3.4 ; 5.1 ; 6.3 ; 7.4 ; 7.5 ; 7.6 ; 7.11 ; 8.2 ; 8.3 ; 11.2
25	Risques de dégradation des sols		7.4 ; 7.5 ; 7.6 ; 7.9 ; 8.2 ; 8.3 ; 8.6 ; 8.7 ; 8.8 ; 8.9 ; 10.1 ; 11.2

* Le régime thermique et la disponibilité en eau peuvent aussi être considérés en tant que grands climats et périodes végétatives. Il est possible de considérer la période végétative comme une qualité de la terre, qui résume les effets de la disponibilité saisonnière en eau et les températures favorables à la croissance végétale.

3.1.1.2. Qualités des terres sous l'angle de la production d'animaux domestiques

- Productivité des pâturages (résultante de nombre des qualités énumérées au point 3.1.1.1)
- Rigueurs climatiques nuisibles aux animaux
- Parasites et maladies endémiques
- Valeur nutritive des terres à pâturage
- Toxicités des terres à pâturage
- Résistance à la dégradation de la végétation
- Résistance à l'érosion du sol en régime de pâturage
- Disponibilités en eau d'abreuvement

3.1.1.3. Qualités des terres sous l'angle de la sylviculture

Les qualités ci-après se rapportent aussi bien aux forêts naturelles qu'artificielles.

- Croissance annuelle moyenne des essences (résultante de nombre des qualités énumérées au point 3.1.1.1).
- Types et quantités d'essences indigènes
- Facteurs d'emplacement influant sur l'établissement de jeunes arbres
- Parasites et maladies
- Risques d'incendies

3.1.1.4. Qualités des terres sous l'angle de l'aménagement et des biens de production

Les qualités énumérées ci-après se rapportent aussi bien aux terres utilisées pour l'agriculture que pour l'élevage ou la sylviculture.

- Facteurs topographiques influant sur la mécanisation (facilité de déplacement)
- Facteurs topographiques influant sur la construction et l'entretien de routes d'accès (accessibilité)
- Taille des unités d'aménagement potentielles (par exemple divisions forestières, exploitations, champs)
- Situation par rapport aux marchés et aux centres d'approvisionnement en biens de production.

3.1.2. Liste des caractéristiques des terres

Les caractéristiques des terres qui pourraient être employées pour évaluer les qualités convenant à l'agriculture pluviale, c'est-à-dire qui peuvent servir de « paramètres diagnostiques » sont énumérées dans le tableau 3.3. Ces caractéristiques peuvent être employées directement ou en tant que moyen d'estimer les qualités des terres, isolément ou en combinant les effets de plusieurs caractéristiques. Certaines n'ont pas une influence directe sur l'agriculture, mais peuvent servir à diagnostiquer d'autres propriétés; par exemple, on emploie la classe de sol pour diagnostiquer des propriétés particulières du sol.

Tableau 3.3. Caractéristiques des terres pouvant servir à estimer les qualités des terres

Caractéristique des terres	Qualités des terres liées à la caractéristique (même n° que dans le tableau 1.1)
1. Caractéristiques du climat	
Les caractéristiques énumérées peuvent, selon les besoins, se rapporter aux valeurs annuelles moyennes, aux valeurs moyennes relevées pendant la saison végétative, au mois critique, au pire mois, aux extrêmes de courte durée, aux limites de confiance de chacune de ces valeurs, aux fréquences ou aux époques.	
1. <i>Classe climatique</i> , Köppen, Thornthwaite, zone agroclimatique, etc.	1, 2; Présélection1/ Diagnostic2/
2. <i>Rayonnement à ondes courtes</i>	1
3. <i>Heures d'ensoleillement</i>	1, 20
4. <i>Durée du jour</i>	1B
5. <i>Température de l'air (sous abri)</i>	2, 8, 10, 16, 20
6. <i>Incidence des gelées</i>	13, 20
7. <i>Précipitations</i> , volume, périodes, intensité	3, 8, 10, 13, 15, 19, 24
8. <i>Force d'impact des pluies</i> , divers indices	24
9. <i>Incidence des orages</i>	12
10. <i>Évapotranspiration</i> , actuelle, potentielle; mesurée ou calculée	3
11. <i>Excédent, déficit hydrique</i>	3
12. <i>Longueur des saisons</i> , humide, sèche, diverses définitions	3, 20
13. <i>Incidence des périodes sèches</i>	3
14. <i>Humidité relative</i>	10, 9, 15, 19
15. <i>Vitesse du vent</i>	12, 24
16. <i>Déficit de l'évapotranspiration relative</i>	3

Caractéristique des terres	Qualités des terres liées à la caractéristique (même n° que dans le tableau 1.1)
<u>2. Caractéristiques du climat du sol</u>	
1. <i>Température du sol</i>	2, 8, 20
2. <i>Régime thermique du sol</i>	2, Présélection
3. <i>Régime hydrique du sol</i>	3, Présélection
<u>3. Caractéristiques des formes du relief</u>	
Les caractéristiques énumérées peuvent, selon les besoins, se référer au voisinage immédiat du poste d'observation ou une zone environnante plus vaste	
1. <i>Classe de relief</i>	24; Présélection Diagnostic
2. <i>Degré de la pente</i>	17, 18, 21, 23, 24
3. <i>Forme de la pente (convexe, concave, etc.)</i>	4, 24
4. <i>Longueur de la pente</i>	17, 24
5. <i>Densité du drainage</i>	21, 23
6. <i>Intervalle des chenaux</i>	21, 23
7. <i>Relief relatif</i>	21, 23
8. <i>Obstacles rocheux, affleurements, blocs</i>	17, 18
9. <i>Microrelief</i>	17, 18
10. <i>Élévation</i>	2
11. <i>Position dans le paysage</i>	12
12. <i>Exposition</i>	12
13. <i>Aspect</i>	1, 2, 3, 10
14. <i>Distribution des formes du relief</i>	22
15. <i>Paramètres géotechniques</i>	17, 18, 21, 23
<u>4. Caractéristiques hydrologiques</u>	
1. <i>Profondeur de la nappe phréatique</i>	3, 4
2. <i>Périodes d'engorgement</i>	4
3. <i>Périodes d'inondation</i>	4
4. <i>Fréquence des crues</i>	11
5. <i>Débit des crues</i>	11
<u>5. Caractéristiques de la végétation et de la faune</u>	
1. <i>Couverture végétale actuelle</i>	15, 18, 24
2. <i>Présence de ravageurs et de maladies endémiques, épidémiques</i>	18
3. <i>Prédateurs sauvages</i>	18
<u>6. Caractéristiques des sols</u>	
Les caractéristiques énumérées peuvent, selon les besoins, se rapporter au sol superficiel (épipedon, approximativement 0-20 cm), aux valeurs moyennes relevées pour les horizons inférieurs (sol superficiel exclu), aux valeurs moyennes pour l'ensemble du profil, à la profondeur minimale à laquelle on rencontre telle propriété ou à l'épaisseur d'un horizon.	
1. <i>Classe de sol, système international ou national</i>	Présélection Diagnostic
2. <i>Classe de drainage du sol</i>	4
3. <i>Horizons diagnostiques</i>	4, 5, 6, 7, 13, 14, 24
4. <i>Distribution du sol</i>	22
5. <i>Présence de tourbe (horizon histique)</i>	22

Caractéristique des terres	Qualités des terres liées à la caractéristique (même n° que dans le tableau 1.1)
<u>7. Morphologie du profil</u>	
1. Couleur	Diagnostic
2. Panachures	4
3. Pierres et graviers	7, 16, 19, 22
4. Texture	3, 4, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 19, 21, 24, 25
5. Structure, degré, classe, type	7, 8, 16, 24, 25
6. Consistance, mouillée, humide, sèche	7, 8, 16, 24, 25
7. Profondeur effective	3, 7
8. Carbonates libres, gypse	14
9. Présence de croûtes superficielles	8, 25
10. Horizon à sulfates acides	14
11. Cimentation, couches indurées	7, 24
<u>8. Conditions physiques du sol et érosion</u>	
1. Caractéristiques hydriques du sol, capacité au champ, point de flétrissement, capacité d'eau utile, valeurs du pf, évapotranspiration relative	3
2. Porosité, densité apparente	7, 24, 25
3. Perméabilité, taux d'infiltration	4, 24, 25
4. Stabilité de la structure	24, 25
5. Indice de floculation	25
6. Potentiel d'oxydo-réduction	4
7. Tendances du sol à s'éroder, divers indices	24
8. Indices d'érosion hydraulique	24
9. Indices d'érosion éolienne	24
<u>9. Chimie du sol</u>	
On notera que, dans de nombreux cas, diverses méthodes d'analyse donnent des résultats sensiblement différents, plus particulièrement en ce qui concerne le pH, le P « assimilable » et la capacité d'échange des cations	
1. pH	5, 13, 14, 15
2. Capacité d'échanges des cations	6
3. Quantité totale des bases échangeables,	5, 6
4. Saturation en cations	5, 6,
5. Azote	5
6. Phosphore « assimilable »	5
7. Potasse échangeable	5
8. Autres éléments nutritifs: Ca, Mg, S, oligo-éléments	5
9. Quantité totale d'éléments nutritifs (en réserve)	5
10. Conductivité électrique de l'extrait saturé	13
11. Quantité totale de sels solubles	13
12. Pourcentage de sodium échangeable (esp)	13
13. Coefficient d'absorption du sodium (sar)	13
14. Présence de substances toxiques, diverses	14
15. Risque de présence de sulfates acides	14
16. Éléments modifiant la classification des coefficients de fertilité (CCF):	
(i) a, h, i, x, k	5
(ii) e	6
(iii) s, n	13

Caractéristique des terres	Qualités des terres liées à la caractéristique (même n° que dans le tableau 1.1)
<u>10. Biologie du sol</u>	
1. Carbone organique, matière organique	5, 6, 25
2. Rapport carbone/azote	5
3. Organismes telluriques	15
<u>11. Minéralogie du sol</u>	
1. Minéraux dégradables	5
2. Minéralogie des argiles	5, 6, 24, 25
<u>12. Localisation</u>	
1. Accessibilité	23

1/ Présélection: peut servir à effectuer une première sélection de zones destinées à être évaluées plus en détail par la suite, et à exclure d'autres zones d'un examen plus approfondi.

2/ Diagnostic: peut servir à identifier d'autres caractéristiques des terres, plus spécifiques.

Note : Éléments modifiant la classification des coefficients de fertilité (CCF)

Le système de classification des coefficients de fertilité comporte trois niveaux: le type (texture du sol superficiel), le type des couches profondes (texture du sous-sol) et 15 éléments modificateurs définis ci-dessous.

Quand plusieurs critères sont cités pour chaque élément modificateur, il suffit qu'un seul soit satisfait. Le critère cité en premier lieu est préférable et c'est celui qu'il faut employer si on dispose des données nécessaires. Les critères suivants peuvent être utilisés si les données sont limitées.

- g = (gley): sol ou panachures ayant une chroma > 2 dans les premiers 60 cm du sol et au-dessous de tous les horizons A, ou sol saturé d'eau pendant moins de 60 jours la plupart des années;
- d = (sec): régimes hydriques de sols xériques, arides ou ustiques (sous-sol sec pendant plus de 90 jours cumulatifs par an), à moins de 20-60 cm de profondeur;
- e = (faible capacité d'échange des cations): ne concerne que la couche de labour ou la couche des 20 premiers centimètres du sol, selon celle qui est la moins épaisse: CEC 4 me/100 g de sol par la somme des bases + KCl - Al extractible (CEC effective) ou CEC < 7 meq/100 g de sol par la somme des cations si le pH = 7, ou CEC < 10 meq/100 g de sol par S des cations +Al + H si le pH = 8,2;
- a = (toxicité par l'aluminium): > 60 pour cent de saturation en Al de la CEC effective dans les 50 premiers cm du sol, ou > 67 pour cent de saturation en acides de la CEC par la somme des cations si le pH = 7 dans les 50 premiers cm du sol, ou > 86 pour cent de saturation en acides

de la CEC par S cations si le pH = 8,2 dans les 50 premiers cm du sol, ou pH < 5,0 dans 1:1 H₂O a moins de 50 cm, sauf dans les sols organiques où le pH doit être inférieur à 4,7;

- h = (acide): 10-60 pourcent de saturation en Al de la CEC effective dans les 50 premiers cm du sol, ou pH H₂O (1:1) compris entre 5,0 et 6,0;
- i = (importante fixation de P par le fer) pourcentage de Fe₂O₃ libre/pourcentage d'argile > 0,15 et plus de 35 pour cent d'argile, ou nuances de 7,5 YR ou plus rouge et structure granulaire. Cet élément modificateur ne s'emploie que dans les types d'argile (C); il ne concerne que la couche de labour ou les 20 premiers centimètres du sol, selon celle de ces couches qui est la moins épaisse;
- x = (sol amorphe aux rayons X): pH > 10 dans 1N NaF, ou réponse positive au test de terrain NaF, ou autres manifestations indirectes d'une prédominance des allophanes dans la fraction argileuse;
- v = (vertisol): argile plastique très adhérente: > 35 pour cent d'argile et > 50 pour cent d'argiles 2:1 gonflantes, ou importants gonflements et retraits du sol superficiel;
- k = (faibles réserves de K): < 10 pour cent de minéraux dégradables dans la fraction limoneuse et sableuse dans les 50 premiers cm du sol ou K échangeable < 0,20 me/100 g, ou K < 2 pour cent de la somme des bases; si les bases < 10 me/100 g;
- b = (réaction basique): CaCO₃ libre dans les 50 premiers cm du sol (effervescence en présence de HCl); ou pH > 7,3;
- s = (salinité): > 4 mmhos/cm de conductivité électrique de l'extrait de sol saturé à 25°C dans le premier mètre du sol;
- n = (natrique): ≥ 15 pour cent de saturation en Na de la CEC dans les 50 premiers cm du sol;
- c = (argile à chats): le pH H₂O (1/1) est < 3,5 après séchage et des panachures de jarosite avec des nuances de 2,5 Y ou plus jaunes et des chromas de 6 (ou plus) sont présentes dans les 60 premiers centimètres du sol;
- ' = (gravier): le signe prime (') indique 15-35 pourcent de particules de gravier ou de particules plus grossières (> 2mm) par volume dans la texture de tout type ou type de couche profonde (exemple: S'L = sable graveleux sur sable limoneux; SL' = limon sableux sur limon graveleux); deux signes primes (") indiquent plus de 35 pourcent de particules de gravier ou de particules plus grossières (> 2mm) par volume dans la texture de tout type ou type de couche profonde

(exemple LC" = sol squelettique limoneux sur argileux; L'C" = limon graveleux sur sol squelettique argileux).

3.1.3. Défauts de certains sols agricoles

3.1.3.1. Principales contraintes à la production agricole

Les contraintes d'importance majeure qui peuvent entraîner le rejet des sols pour la plupart de cultures sont essentiellement physiques (forte pente, profondeur insuffisante, hydromorphie, banc de sable, etc), chimiques (forte acidité, salinité, sodicité, toxicités et pollutions diverses, etc) ou biologiques.

A. Forte pente

Les travaux agricoles sont fortement contraints par le relief environnemental. Plus particulièrement, des pentes supérieures à 30% entraînent de fortes limitations agricoles (grande sensibilité à l'érosion et mécanisation des cultures difficiles). Ces zones de fortes pentes pourraient être préservées pour le maintien de la biodiversité.

B. Profondeur de sol utile insuffisante

La profondeur du sol, exploitable par les racines, peut être limitée par un certain nombre de caractéristiques : nappe perchée, cuirasse ou système de drainage latéral (horizon imperméable à l'eau et aux racines). Les zones pour lesquels la profondeur de sol est inférieure à 20 cm sont généralement à exclure pour les types de cultures conventionnels (pâturage, maraîchage, verger). Ces zones pourraient cependant être attribuées pour de la production hors-sol.

C. Engorgement

Peu de plantes cultivées supportent une hydromorphie pratiquement permanente. Ces zones pourraient être destinées à des cultures tolérantes à l'hydromorphie.

D. Sols sableux

Les sols sableux indiquent un fort lessivage des sols (baisse des propriétés physicochimiques, sols peu fertiles et sur une période très courte de 2-3 ans). La rareté de ces habitats pourrait servir de réserve de biodiversité.

E. Zones fortement affectés par les toxicités diverses

Il s'agit des zones chimiquement dégradées par la salinité, la sodicité, l'acidité, sols sulfatés acides, etc) ainsi que les zones polluées. La mise en culture de ces zones ne peut se réaliser qu'après les travaux de réhabilitation qui sont souvent très onéreux et difficiles à réussir.

E. Zones dégradées par les travaux d'aménagement

Il peut s'agir par exemple de zones de carrières ou des mines en exploitation.

3.1.3.2. Quelques niveaux d'appréciation de la qualité du sol agricole par rapport aux facteurs limitants

A. Faible pente

Pour éviter l'érosion des sols, seules les zones les moins pentues sont conservées pour la mise en place des grands types de cultures (pentes < 30%). Toutefois, il n'est pas recommandable d'effectuer une agriculture mécanisée pour des pentes de plus de 20% (Boyer 1982).

Tableau 1.3. Limitation agricole en fonction de la pente (Boyer, 1982)

Degré des limitations agricole	FAO Tropiques humides (Sys, 1978)		
	Cultures annuelles	Cultures pérennes et pâturage	Arbres
Limitation nulle	0-2 %	0-8 %	0-16 %
Limitation faible	2-8 %	8-16 %	16-30 %
Limitation moyenne	8-16 %	16-30 %	>30 %
Limitation forte	16-30 %	>30 %	
Limitation très forte	>30 %		

B. Profondeur du sol utile

La profondeur du sol facilement exploitable par les racines peut être limitée par un certain nombre de caractéristiques, comme vu précédemment (cuiresse rocheuse, nappe,...).

Tableau 1.3. Limitations culturales en relation avec la profondeur du sol utile (Boyer, 1982)

Types de plantes cultivées	Minimum absolu	Minimum souhaitable
Plantes annuelles à racines fasciculées : Riz, maïs ; sorgho ; arachide ; haricots ; courges ; sésame	15 à 20cm	40 cm
Plantes annuelles à rhizome et tubercules : Manioc ; igname ; tarot ; pomme de terre	30cm	50cm
Bananier	30cm	50cm
Cotonnier et plantes annuelles à pivot	40cm	60cm
Canne à sucre	30cm	80cm
Caféier, palmier à huile, cocotier	60cm	100cm
Cacaoyer, théier	80cm	120cm
Hévéa	75cm	100cm

C. Texture

La stabilité structurale d'un sol est assurée par la texture, la teneur en matière organique et sa capacité à retenir l'eau. On étudie la texture par analyse granulométrique : analyse consistant à classer les éléments du sol d'après leur grosseur et à déterminer le pourcentage de chaque fraction. On compte trois grandes classes de sol basées sur la grosseur des particules : les sols sableux, les sols limoneux et les sols argileux. A partir de ces grandes classes, plusieurs groupes sont définis (argilo-sableux, sablo-limoneux,...). Il existe des contraintes culturales fortes pour les sols présentant moins de 10% d'argile (sols sableux, non-rétention de la matière organique) et plus de 40% d'argile (sol argileux, saturation en eau). Les sols de meilleurs qualité sont les sols sablo-argileux (de 10 à 25% d'argile), argilo-sableux (de 25 à 40% d'argile) ainsi que ceux constitués en partie par du limon.

Tableau 1.4. Limitations culturales en fonction de la texture (Boyer, 1982)

Horizon A	Horizon B	Limitations culturales
Sablo-argileux	Argilo-sableux	Nulle
Argilo-sableux	Argilo-sableux	Faible
Sableux	Sablo-argileux	Moyenne
Sableux	Argileux	Moyenne à forte
Argileux	Argileux	Forte

D. Teneur en matière organique

Élément essentiel de la fertilité, elle est l'unique fournisseur d'azote pour les plantes (en dehors des plantes fixatrices de l'azote atmosphérique) et contient une bonne part des cations échangeables et du phosphore en milieu tropical. Elle atténue également la compacité des sols ferrallitiques. La matière organique (MO) joue également un rôle fondamental pour le maintien de sols vivants à long terme. Un taux de matière organique élevé favorise le développement des micro-organismes et de la faune des sols. Ce sont ces mêmes micro-organismes qui mettent ensuite les éléments minéraux à disposition des plantes grâce à la minéralisation de cette matière organique. Cependant une forte teneur en matière organique n'est pas toujours synonyme de bonne qualité des sols (ex : tourbière) car elle peut être plus ou moins facilement dégradable suivant sa composition.

Tableau 1.5. Limitations agricoles suivant la teneur en matière organique en % (Boyer, 1982)

	nulle	légère	modérée	forte
Cultures exigeantes	>2,4	1,5-2,4	0,8-1,5	<0,8
Cultures moyennement exigeantes	>2	1-2	<1	
Cultures peu exigeantes	>1,5	0,8-1,5	<0,8	

E. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH du sol mesuré à l'eau distillée est une donnée très largement utilisée pour évaluer grossièrement les possibilités agricoles tout en sachant qu'il est possible de rectifier en partie un pH acide par du chaulage. Par ailleurs, les plantes présentent des tolérances au pH qui sont une caractéristique propre à l'espèce (plantes acidophiles ou basophiles) sur lequel il est possible de jouer dans le choix des cultures suivant les conditions du sol. Il est intéressant de noter que les sols tropicaux, comme au Burundi, se caractérisent souvent par des pH acides.

Tableau 1.6. Conditions de pH acceptables pour les plantes cultivées (Boyer, 1982)

Plantes	Intervalle de tolérance de pH	pH optimum limitation nulle ou faible
Ananas	4,0-6,5	4,5-5,0
Arachide	4,2-7,5	6,0-7,0
Bananier	4,0-7,0	5,5-6,5
Cacaoyer	4,0-8,0	6,0-7,5
Caféier	4,5-7,0	5,5-6,5
Canne à sucre	4,0-8,9	6,0-8,0
Cocotier	5,0-8,0	5,8-7,0
cotonnier	5,2-8	6,6-7,5
Haricot	5,0-7,5	5,4-7,0
Hévéa	3,2-6,0	4,3-5,0
Maïs	3,7-8,0	5,4-7,5
Manioc	4,0-7,0	5,5-6,5
Mil	4,0-8,0	5,0-7,5
Palmier à huile	3,2-7,0	4,0-6,0
Patate douce	5,25-7,5	6,0-7,0
Pyrèthre	5,5-7,8	6,5-7,2
Riz	3,8-8,4	5,5-6,5
Soja	4,8-7,5	5,2-7,0
Théier	3,9-6,5	4,5-5,6

F. Fonctionnement biologique

Les bio-indicateurs utilisés pour évaluer les fonctions biologiques du sol sont basés sur la mesure des principales fonctions microbiennes liées aux cycles du carbone et de l'azote, c'est-à-dire sur la capacité du sol à transformer la matière organique en éléments nutritifs pour la plante. Les fonctions choisies pour évaluer la qualité du sol dans son fonctionnement microbien sont la respiration pour la minéralisation de la matière organique du sol et la dénitrification pour la perte potentielle du nitrate du sol sous forme gazeuse N_2O , N_2 .

- La respiration

La respiration microbienne du sol concerne l'ensemble des micro-organismes dans leur diversité et abondance. Elle nous renseigne sur la capacité de la communauté microbienne hétérotrophe du sol à dégrader la matière organique. Elle peut aussi être considérée comme un indicateur de la biomasse microbienne totale active du sol et donc de sa capacité biotique.

- La dénitrification

L'étape finale du cycle de l'azote s'appelle la dénitrification, au cours de laquelle un autre groupe de bactéries transforment le nitrate en gaz azoté qui est libéré dans l'atmosphère. Cette étape se déroule principalement lorsque le sol est saturé d'eau et concourt à une perte d'azote minéral dans les sols.

3.2. Exigences des utilisations des terres:

Il s'agit des besoins spécifiques de chaque utilisation en termes de climat, sol, relief, etc.

Les exigences des utilisations des terres dans l'évaluation de l'aptitude des terres se divisent en trois catégories principales : les besoins physiologiques des cultures, qui concernent les conditions nécessaires à leur croissance ; les besoins d'aménagement, qui incluent les contraintes techniques liées à la mécanisation et à l'infrastructure ; et les besoins de conservation, qui visent à prévenir l'érosion et la dégradation des sols à long terme.

Voici une description plus détaillée de ces exigences :

Besoins des cultures

- **Besoins physiologiques** : Il s'agit des exigences fondamentales des plantes ou des espèces pour leur croissance, comme la profondeur du sol, la disponibilité en eau, les besoins en nutriments, ou encore le pH du sol.
- **Exigences spécifiques** : Chaque culture a des exigences particulières en termes de conditions physiques, comme le climat, la texture du sol, et la capacité d'enracinement.

Besoins d'aménagement

- **Conditions d'exploitation** : Ces exigences tiennent compte des techniques d'aménagement requises pour une utilisation donnée, comme le niveau de mécanisation, l'accès aux terres, ou la nécessité de construire des infrastructures spécifiques (irrigation, drainage).
- **Intrants et coûts** : L'évaluation prend en compte la quantité et le coût des intrants nécessaires (engrais, main-d'œuvre), ainsi que les coûts d'exploitation et d'amélioration des terres.

Besoins de conservation

- **Prévention de la dégradation** : Ces exigences visent à s'assurer que l'utilisation des terres n'entraîne pas de risques d'érosion, de perte de fertilité ou d'autres formes de dégradation physique, chimique ou biologique du sol.
- **Durabilité** : Il est crucial de considérer la capacité de la terre à supporter une utilisation continue sans se détériorer, afin de préserver les ressources pour les générations futures.

3.3. Facteurs climatiques:

La température, les précipitations, l'ensoleillement sont des facteurs clés pour de nombreuses utilisations.

Les facteurs climatiques sont divers, mais comprennent souvent des indications sur :

- La température (moyenne, minimale et maximale, les extrêmes)
- La précipitation
- La durée de la saison sèche
- L'humidité relative
- L'insolation relative

L'évaluation du climat pour un type d'utilisation de terres est effectuée par une comparaison des exigences des cultures avec les données climatologiques de la région ou de la zone étudiée. En effet, le climat est caractérisé par ses facteurs composants, tels que la précipitation et sa distribution annuelle, la température et sa variation, l'humidité relative, l'insolation, la vitesse du vent, etc.

On peut dire qu'en général la croissance d'une culture nécessite une période pendant laquelle la précipitation et la température permettent le développement de la plante : la période de croissance.

On comprend l'importance capitale de préciser pour les cultures vivrières la période de semis et de récolte (calendrier agricole) pour connaître la longueur du cycle de croissance.

Précipitation : exprimée en mm, et fait référence à la précipitation annuelle, ou à la précipitation pendant la période de croissance, ou encore à la précipitation pendant une période spécifique du développement de la plante. La connaissance des précipitations mensuelles suffit pour évaluer ce paramètre.

Longueur de la saison sèche : exprime en mois ; il s'agit du nombre de mois (période continue) avec une précipitation inférieure à 50 mm.

Cycle cultural (=Longueur réelle de la période de croissance) : exprimée en jours ; il s'agit de la période pendant laquelle la culture se trouve sur le champ, donc la longueur du cycle de croissance.

Températures : exprimées en °C.

- Température maximale moyenne (mensuelle ou annuelle) : la moyenne des températures maximales journalières maximum pendant la période concernée ; la valeur journalière maximum pendant cette période est la température maximale absolue.
- Température minimale moyenne (mensuelle ou annuelle) : la moyenne des températures minimales journalières pendant la période concernée ; la valeur journalière minimum pendant cette période est la température minimale absolue.
- Température moyenne : la moyenne des températures maximales moyennes et minimales moyennes pour la période concernée.
- Le mois le plus chaud : fait référence au mois avec la température maximale la plus élevée
- Le mois le plus froid : fait référence au mois avec la température minimale la plus basse
- L'humidité relative : exprimée en % ; il s'agit de l'humidité relative moyenne des valeurs journalières moyennes de la période concernée. Elle est notée HR
- L'insolation relative : exprimée en % ; il s'agit du rapport entre la durée d'insolation réelle et la durée maximale astronomiquement possible. Elle est notée n/N.

Les facteurs considérés par culture varient, mais peuvent être regroupés comme suit :

- Précipitation (y compris la longueur de la saison sèche) ;
- Température ;
- Humidité relative ;
- Insolation.

Pour chacun de ces sous-groupes, on utilise la limitation la plus prononcée, et la combinaison des 4 limitations résultantes donne la classe d'aptitude climatique.

3.4. Facteurs édaphiques:

Les facteurs édaphiques sont les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol qui influencent l'aptitude des terres aux utilisations. Ils incluent des éléments tels que la texture (proportion de sable, limon et argile), la structure du sol, le pH, la teneur en eau et l'aération, le drainage, la présence d'éléments nutritifs, la salinité, et le complexe argilo-humique. L'évaluation de ces facteurs permet de déterminer si une terre est adaptée à une utilisation spécifique, comme la culture.

3.4.1. Facteurs physiques

Texture du sol

La texture du sol est le rapport des particules de sable, de limon et d'argile. Elle détermine la capacité du sol à retenir l'eau et les nutriments.

Structure du sol

La structure du sol est l'agencement des particules de sol en agrégats. Elle influence la porosité et la perméabilité du sol.

Porosité et perméabilité

La porosité est l'ensemble des vides dans le sol, tandis que la perméabilité mesure sa capacité à laisser passer l'eau.

Teneur en eau et aptitude au drainage

Un bon équilibre entre la capacité de rétention d'eau et un drainage adéquat sont cruciaux pour la santé des plantes.

3.4.2. Facteurs chimiques

pH du sol

Le niveau de pH affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes et influence l'activité microbienne. Elle affecte aussi la solubilité de certains éléments toxiques (Al, Mn, ...) et la mobilité des polluants dans le sol.

Salinité et sodicité

La salinité est le niveau de sels dans la solution du sol ; tandis que la sodicité est la proportion du sodium sur le complexe d'échange. Des niveaux élevés de sel (seuil pris par le USDA : Conductivité électrique ≥ 4 dS/m) ou de sodium (seuil pris par le USDA : *Exchangeable Sodium Percentage* $\geq 15\%$) peuvent être toxiques pour la plupart des cultures.

Éléments nutritifs

La disponibilité d'éléments essentiels comme l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) est déterminante pour la fertilité. Seize éléments du sol sont considérés comme essentiels pour la croissance des plantes. Il s'agit de: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cl.

A cette liste s'ajoute 5 autres éléments : Na, Si, Co, V et Ni qui ont été reconnus comme nécessaires à la croissance de certaines espèces de plantes. Les teneurs du sol en ces éléments sont à analyser pour une évaluation complète de l'aptitude d'une terre pour une culture donnée.

Complexe argilo-humique

Les composés humiques forment avec des minéraux du sol des complexes organo-minéraux qui jouent un rôle important dans l'édification des structures du sol par la formation des agrégats. Ces complexes sont dotés de charges négatives et positives. L'ensemble des charges négatives d'une masse de sols donnée est appelé Capacité d'Echange Cationique (CEC). Celle-ci indique le pouvoir de rétention des ions positifs.

Il est également nécessaire de déterminer les valeurs caractéristiques du complexe d'échange suivantes : Capacité d'échange cationique Effective (CEC), la Somme des bases échangeables (S), le taux de saturation en bases, le taux de saturation en aluminium (pour les sols acides) et le taux de saturation en sodium (*Exchangeable Sodium Percentage*, pour les sols salins).

3.4.3. Facteurs biologiques

Matière organique

La matière organique du sol (MOS) joue des rôles cruciaux pour la santé et la fertilité des sols, notamment en améliorant leur structure, en augmentant la rétention d'eau et de nutriments, en stockant le carbone et en favorisant la biodiversité microbienne. Elle nourrit les organismes du sol, libère des nutriments essentiels pour les plantes, piège les polluants et contribue à la formation d'agrégats stables qui améliorent l'aération.

Vie du sol

La faune et les micro-organismes du sol sont essentiels en agriculture car ils participent à la structure du sol, à son aération, à la décomposition de la matière organique, au cycle des nutriments et au contrôle des ravageurs. Une vie du sol riche favorise la fertilité, la disponibilité des nutriments pour les plantes et la santé générale des écosystèmes agricoles, permettant des pratiques plus durables.

3.5. Facteurs topographiques

3.5.1. Les facteurs

Les facteurs topographiques, tels que la pente, l'altitude, la morphologie d'une terre (sommet, piémont, bas-fond) et l'exposition, influencent son aptitude agricole en affectant l'érosion, l'accès à l'eau et les possibilités de mécanisation. Une pente faible favorise les cultures mécanisées, tandis

qu'une pente forte limite l'accès et augmente le risque d'érosion, nécessitant des aménagements spécifiques. Ces facteurs déterminent l'aptitude des terres pour diverses cultures et l'importance des aménagements nécessaires, comme le drainage ou l'irrigation.

Pente

L'inclinaison du terrain est un facteur crucial. Des pentes faibles à modérées (par exemple, 0 à 8%) sont favorables à la culture mécanisée, tandis que des pentes plus prononcées (8 à 16% ou plus) peuvent nécessiter des engins spéciaux, voire une culture manuelle, et impliquent des risques d'érosion.

Morphologie (Forme du relief)

La position du terrain (sommet, piémont, bas-fond) affecte son aptitude. Les bas-fonds peuvent être sujets à l'engorgement, et les sommets, plus exposés au vent et à l'érosion, nécessitent une évaluation attentive.

Exposition

L'exposition, en tant que facteur environnemental majeur, joue un rôle crucial dans l'évaluation de l'aptitude des terres en influençant directement le climat et donc la croissance des cultures. Une exposition solaire adéquate et une orientation favorable améliorent les conditions de développement végétal, tandis qu'une exposition défavorable (comme l'ombre excessive ou les vents violents) peut limiter la productivité et nécessiter des adaptations. L'évaluation doit donc intégrer l'exposition solaire et les expositions au vent pour déterminer l'aptitude d'un sol à des usages spécifiques, tels que l'agriculture ou la mise en place d'installations solaires.

3.5.2. Prise en compte de la topographie dans la prise de décision

Exigences pour les aménagements

La topographie détermine la complexité des infrastructures nécessaires. Par exemple, l'irrigation par gravité est influencée par la topographie, nécessitant des ouvrages pour franchir des obstacles ou acheminer l'eau en altitude. Le drainage est également conçu en fonction de la pente et du relief du terrain.

Risque d'érosion

Les pentes fortes augmentent le risque de dégradation des sols par érosion, ce qui limite la capacité de la terre à soutenir une production agricole durable.

Mise en valeur des terres

La topographie joue un rôle dans l'évaluation des coûts de mise en valeur. Les terrains escarpés nécessitent des coûts plus élevés pour les aménagements, l'irrigation et les opérations de défrichage.

Accessibilité et localisation

L'emplacement d'une terre, notamment par rapport aux infrastructures existantes comme les routes, les réseaux d'eau, et la taille des parcelles, est lié à la topographie et influence l'aptitude des terres pour la mécanisation et l'irrigation.

En résumé, la topographie est un facteur déterminant pour évaluer si une terre est adaptée à une utilisation agricole, en tenant compte de son potentiel à supporter des cultures, des risques d'érosion et de la viabilité des aménagements nécessaires.

Chapitre 4. La classification de l'aptitude d'une terre

4.1. Le système de classification de la FAO

La structure de l'évaluation de l'aptitude des terres FAO (Tableau 4.1) est hiérarchique. Elle comprend les ordres d'aptitude, les classes d'aptitude (indiquant le degré d'aptitude selon les limitations), et les sous-classes d'aptitude (spécifiant les types de limitations ou les améliorations nécessaires). L'évaluation elle-même repose sur l'analyse des relations entre les caractéristiques des terres et les exigences de divers usages, comme l'agriculture, pour déterminer la réponse des terres à des utilisations spécifiques

Les différentes classes d'aptitude des terres sont obtenues en faisant correspondre les exigences du type d'utilisation des terres avec les qualités de la terre. Le cadre de la FAO pour l'EAT distingue les caractéristiques des terres (attributs des terres qui peuvent être mesurés, comme l'angle de la pente) ; et les qualités des terres (ensembles complexes de caractéristiques des terres qui agissent de concert pour déterminer la performance d'un type d'utilisation des terres). Ainsi, la disponibilité de l'eau est une qualité du sol. Il s'agit d'un attribut dynamique des terres résultant de l'interaction de plusieurs caractéristiques du côté de la demande et de l'offre, qui ne peut donc pas être mesuré directement, mais qui peut être modélisé.

Tableau 4.1. Structure du cadre d'évaluation de l'aptitude des terres de la FAO

Catégorie				
Ordre	Classe	Sous-classe	unité	
S : Apte	S1 : Très apte			
	S2 : Moyennement apte	S2m		
		S2e	S2e-1	
			S2e-3	
	S3 : marginalement ou conditionnellement apte	S3t		
		S3w		
		S3e		
N : Inapte	N1 : marginalement inapte			
	N2 : Définitivement inapte			

Le cadre de la FAO pour l'évaluation des terres est structuré sur quatre niveaux :

-ordres d'aptitude des terres. La première catégorisation est APTE/INAPTE pour un type d'utilisation des terres spécifiée - appelé ordre d'aptitude des terres.

Apte signifie qu'un type d'utilisation durable considéré produira des bénéfices justifiant les intrants sans risque inacceptable de dommages aux ressources foncières.

Inapte signifie que le type d'utilisation des terres est techniquement irréalisable, qu'il entraînerait une dégradation inacceptable des ressources foncières ou que la valeur des bénéfices escomptés ne justifie pas les coûts escomptés des intrants nécessaires.

- **Classes d'aptitude des terres.** Elles reflètent les degrés d'aptitude. Deux classes peuvent suffire ; la FAO recommande de ne pas dépasser trois classes, comme suit :

Classe S1 (Très apte) : Terres n'ayant pas de limitations significatives pour une utilisation durable, ou seulement des limitations mineures qui ne réduiront pas de manière significative la productivité ou les bénéfices et n'augmenteront pas les intrants au-delà d'un niveau acceptable ;

Classe S2 (Moyennement apte) : Terres présentant des limitations qui, dans l'ensemble, réduiront la productivité ou les bénéfices et augmenteront les intrants nécessaires de sorte que l'avantage à tirer de l'utilisation des terres - bien que toujours intéressant - sera inférieur à celui attendu pour les terres de classe S1 ;

Classe S3 (Marginalement apte ou Conditionnellement apte): Terres présentant des limitations qui, dans l'ensemble, sont si sévères que les dépenses liées à l'utilisation des terres ne seront justifiées que de façon marginale.

Dans l'ordre des terres inaptes, il y a deux classes :

Classe N1 (marginale inapte) : Terres ayant des limitations qui sont surmontables avec le temps, mais qu'on ne peut pas corriger en l'état actuel des connaissances à un prix acceptable. Ces limitations sont sérieuses au point d'interdire la réussite de telle ou telle utilisation continue des terres.

Classe N2 (définitivement inapte): Terres ayant des limitations très sérieuses qui semblent interdire toute possibilité de réussite de telle ou telle utilisation.

- **Sous-classes d'aptitude des terres.** Elles reflètent les types de limitations, par exemple le manque d'eau, le risque d'érosion - S2w, S3e. Il n'y a pas de sous-classes dans la catégorie S1.

- **Unités d'aptitude des terres.** Il s'agit de subdivisions d'une sous-classe qui diffèrent par leur réaction à la gestion. Les unités sont significatives au niveau de l'exploitation. Elles se distinguent par des chiffres arabes, par exemple S2e-1, S2e-2. On peut subdiviser une sous-classe en un nombre illimité d'unités.

Il convient de ne pas confondre les unités d'aptitude des terres avec les unités de terre. Les premières sont une catégorie de la classification, les secondes une superficie de terre.

Tableau 4.2. Exemples de grille d'évaluation de l'aptitude des terres (Dent et Ridgway, 1986, cités par Dalal-Clayton et Dent, 1993)

Qualitative Application of the FAO Framework for Land Evaluation: Example of Land Requirements for Bunded Rice, Sri Lanka

LAND QUALITIES	DIAGNOSTIC LAND CHARACTERISTICS	LIMITING VALUES FOR LAND CHARACTERISTICS			
		S1	S2	S3	N
Sufficiency of energy	Mean annual temp, °C	>24	21 - 24	18 - 21	< 18
	Elevation, m*	0 - 600	600 - 1200	1200 - 1800	> 1800
Sufficiency of water	75% probability rainfall, mm	> 1300	900 - 1300	500 - 900	< 500
	Soil drainage class	Poorly drained	Imperfectly drained	Well drained, Moderately well drained	Excessively drained
	Soil texture	C,SC,SCL,L	SC,SCL,SL	SL	S,LS
	Soil depth, cm	> 80	60 - 80	40 - 60	< 40
Sufficiency of nutrients	pH of flooded soils	6 - 7	5 - 6	4.5 - 5	< 4.5
			7 - 8	8 - 8.5	> 8.5
Salinity hazard	EC _e , mS cm ⁻¹	< 3	3 - 5	5 - 7	> 7
Ease of water control	Slope angle, degrees	< 1	1 - 2	2 - 6	> 6
Ease of cultivation	Stones and rock outcrops, %	nil	1 - 5	5 - 10	> 10

* Elevation is used to assess sufficiency of energy where temperature data are not available.

4.2. Autres systèmes de classification

Outre le Cadre de la FAO pour l'évaluation des terres, il existe de nombreux autres systèmes d'évaluation de l'aptitude des terres. Les plus répandus sont la classification des aptitudes des terres, le système de classification des terres de l'USBR (*United States Bureau of Reclamation*) pour les périmètres irrigués et les indices paramétriques.

Au Burundi, l'ISABU a mis au point au cours des années 1990 une méthodologie pour évaluer l'aptitude agricole des terres au Burundi en confrontant les données de la carte pédologique à 1/250.000 et les données climatiques d'un côté et les exigences de la culture considérée de l'autre côté. Ce système burundais s'inspire du cadre de la FAO pour l'évaluation des terres.

4.2.1. Classification des aptitudes des terres de l'USBR

La méthode la plus connue et la plus utilisée est la classification des aptitudes des terres, initialement développée par le Service de conservation des sols des États-Unis (*United States Soil Conservation Service*) dans les années 1930 pour interpréter les cartes pédologiques conventionnelles au 1/20 000 à des fins de planification agricole.

Les terres sont classées selon leur degré de limitation à une utilisation durable et les mesures de conservation des sols nécessaires à leur maintien en exploitation productive (Tableau 4.3). Les limitations d'utilisation prises en compte sont celles que l'agriculteur ne peut pas corriger (par exemple le climat, la pente, la profondeur du sol, la vulnérabilité aux inondations) et sont reconnues au niveau des sous-classes. Un troisième niveau de classification, au sein de la sous-classe, est l'unité d'aptitude, qui regroupe les sols nécessitant une gestion similaire et adaptés à des cultures similaires. Les terres attribuées à une classe particulière présentent une aptitude à l'utilisation définie (par exemple, classe I : arable, sans restrictions) et à toutes les utilisations autorisées pour les classes inférieures (la classe I est donc également adaptée au pâturage, à la foresterie et à la faune sauvage). Cela n'indique pas nécessairement quelle utilisation est la plus productive ou rentable.

La classification suppose les moyens techniques, les ressources en capital et les compétences des meilleurs agriculteurs dans les conditions locales et un ratio production/intrants favorable. L'accès aux marchés, la forme et la taille des parcelles et la propriété foncière ne sont pas pris en compte.

Ce système de classification des terres regroupe les terres en fonction de leur aptitude à la production agricole. Ce système identifie huit classes d'aptitude, les classes 1 à 4 étant considérées comme des terres arables, tandis que les classes 5 à 8 sont généralement non arables.

Chaque classe d'aptitude peut être subdivisée en sous-classes pour indiquer le type de limitations (par exemple, érosion, humidité du sol, etc.).

Objectifs du système: Le système de classification de l'USDA vise à aider les agriculteurs, les planificateurs et les gestionnaires des terres à prendre des décisions éclairées concernant l'utilisation des terres, en tenant compte de leurs limitations et de leur potentiel de production agricole.

Tableau 4.3. Classes d'aptitude des terres du Service de conservation des sols de l'USDA

Terres productives convenant à la culture

1. Classe I. terres de plaine ou de fond de vallée. Pente quasi-nulle. Pas d'érosion. Non inondables, bien drainées. Pas de pierres en excès. Ne nécessitent qu'un entretien régulier de la fertilité par rotations, amendements, engrais....
2. Classe II. Terres moins fertiles, souvent en légère pente (inférieure à 3%). L'érosion est possible ou a déjà aminci le sol. Nécessitent des mesures simples de conservation des eaux et du sol telles que labour le long des courbes de niveau ou culture en bandes alternées, labour en planches, et surtout rotations améliorantes, avec limitation des périodes sans couverture végétale. Epierrage éventuel.
3. Classe III : Terres plus éprouvées par l'érosion. Pentes jusqu'à 12%. Mesures impératives de lutte contre l'érosion et de maîtrise des eaux, les mêmes pour la classe II, mais avec en plus certains terrassements, (banquettes, fossés) pour un contrôle plus rigoureux de l'évacuation des eaux sans érosion.
4. Classe IV : Terres déjà sérieusement érodées, soumises à une culture intermittente. Pente jusqu'à 16%. A maintenir en prairie ou forêt et à ne cultiver que si l'on manque de terrain, avec tous les procédés antiérosifs et de contrôle des eaux, et une rotation faisant la plus large place à la prairie de longue durée :

Terres à soumettre au régime de la couverture permanente

5. Classe V : Terres trop pauvres pour être labourées, mais résistantes à l'érosion (pente faible ou même pas de pente) : Sols peu profonds ou trop asphyxiants mais non drainables. A maintenir en prairie permanente ou à boiser.
6. Classe VI : Mêmes terres que celles de la classe V mais avec une pente souvent supérieure à 20%. Même utilisation mais avec des précautions supplémentaires pour éviter le surpâturage et l'érosion qui en résulte.

7. Classe VII : Terres aussi pentues que celles de la classe VI mais beaucoup plus épuisées par l'érosion. Ne conviennent au pâturage qu'avec de strictes mesures antiérosives. Conviennent surtout au boisement, avec des procédés éventuels de terrassement.

8. Classe VIII : Terres accidentées, roches à nu, éboulis, marécages, fondrières. A réserver au boisement spontané, aux réserves naturelles de faune.

Remarque: Les 8 classes de terres de la classification de l'US conservation service tiennent compte de la sensibilité à l'érosion

Le jugement d'experts et les essais sur le terrain sont nécessaires pour spécifier les critères des classes et sous-classes, et la force et la large application du système résident dans cette flexibilité - des critères appropriés aux conditions locales doivent être spécifiés.

Il est étonnant de constater que les critères originaux de l'USDA ont parfois été adoptés sans changement dans des environnements technologiques et physiques très différents.

La classification des aptitudes des terres est relativement facile à réaliser et à utiliser. Les utilisateurs sont beaucoup plus à l'aise avec les cartes d'aptitude des terres qu'avec les cartes pédologiques ou d'autres études complexes des ressources foncières. Après tout, la classe I est évidemment la meilleure, la classe III est moins bonne et la classe VI est nulle.

La lacune la plus évidente de ce système est que les terres ne peuvent pas être classées de la meilleure à la pire, quel que soit le type d'utilisation. Certains types d'utilisation ont des exigences et des tolérances particulières que d'autres n'ont pas, par exemple : (1) Le riz a besoin d'un sol à forte teneur en eau disponible et tolère des inondations prolongées ; les autres céréales ne tolèrent pas l'engorgement pendant leur période de croissance active ; (2) Le thé, la canne à sucre et le palmier à huile ont besoin d'un sol à forte teneur en eau disponible et tolèrent des inondations prolongées.

4.2.2. Classification de l'irrigabilité des terres (CIT)

Ce système de classification prédit l'aspect des terres irriguées et/ou drainées, notamment l'évolution de la nappe phréatique, de la salinité ou de la sodicité, ainsi que leur configuration. L'objectif de la CIT est de sélectionner les terres à irriguer et de caractériser leurs principaux facteurs de gestion. Cela permet d'identifier les terres arables propices à l'irrigation et les terres

irrigables qui seront effectivement irriguées. Des terres arables peuvent ne pas être irriguées en raison de contraintes géographiques, telles qu'un approvisionnement en eau impossible ou une parcelle isolée ou de forme irrégulière. Ce système est utile pour la sélection des terres irrigables, l'estimation des besoins en eau, les coûts de développement et les bénéfices de l'irrigation.

Le système CIT comprend six classes d'irrigabilité (Tableau 4.4.), chacune composée de trois sous-classes basées sur la limitation prédominante, à savoir la topographie (t), le sol (s) et le drainage (w). Une sous-classe fait référence à la limitation dominante de la classe d'irrigabilité des terres concernée. La sous-classe comporte peu d'unités de capacité basées sur l'uniformité de la gestion. Les unités d'irrigabilité des terres sont le groupe de terres qui sont presque identiques en termes d'aptitude à l'irrigation.

Tableau 4.4. Critères de classification des terres en fonction de leur aptitude à l'irrigation (Manikandan et al., 2013)

Class	1	2	3	4	5	6
Arability	Arable	Arable	Arable	Limited Arable	Temporarily Non-Arable	Non-Arable
Repayment capacity	High	Intermediate	Intermediate	Low	-	Not repayable
Crop suitability	Wide	Restricted	Restricted	Few specific crops	Not suitable	Not suitable
Yield	High and sustained	Moderate and sustained	Moderate and sustained	Low	Very low	Extremely low
Water use	Efficient	Moderately efficient	Moderately efficient	Little efficient	Very low efficient	Inefficient
Physical parameters						
Slope %	< 1	1-3	3-5	5-10	> 10	> 10
Soil depth (cm)	> 90	45-90	22,5-45,0	7,5-22,5	< 7,5	< 7,5
Permeability mm/hr	5,0-50	50-130	130-250	> 250	> 250	> 250
Texture	Sandy loam, clay loam	sandy loam, sandy clay loam	Clay, loamy sand	sandy, clay	Any	Any
WHC (cm)	12	9-12	6-9	2-6	< 2	< 2

4.2.3. Approche quantitative d'évaluation de l'aptitude des terres

4.2.3.1. Indice Storie

La classification des sols pour une utilisation donnée peut être établie en fonction des caractéristiques du sol. L'indice Storie (Storie, 1978) exprime numériquement le degré relatif d'aptitude d'un sol à l'agriculture intensive générale. La classification repose sur quatre facteurs, à savoir les caractéristiques du profil du sol, la texture de la surface, la pente et d'autres facteurs tels que le drainage, l'alcalinité, etc. Des notes (0-100) sont attribuées à chaque facteur en fonction des

conditions sur le terrain. Une note de 100 % correspond aux conditions les plus favorables, tandis qu'un pourcentage inférieur indique des conditions moins favorables. L'indice final est obtenu en multipliant chaque note utilisée pour l'évaluation. Un seul facteur modéré peut réduire considérablement la valeur de l'indice, ce qui limite son utilisation.

4.2.3.2. Évaluation de la productivité.

Riquier et al. (1970) ont élaboré un système d'évaluation des sols en termes de productivité réelle et potentielle. Il s'agit d'une version modifiée de l'indice Storie. Neuf facteurs, à savoir l'humidité (H), le drainage (D), la profondeur (P), la texture (T), la saturation en bases (N), les sels solubles (S), la matière organique (O), la CEC (A) et les réserves minérales (M), sont évalués sur une échelle de 0 à 100, puis les pourcentages sont multipliés cumulativement pour obtenir l'indice de productivité (PI). Cet indice est obtenu à l'aide des formules ci-dessous.

$$PI = H \times D \times P \times T \times N \times S \times O \times A \times M$$

En fonction de la note cumulative obtenue, le sol est classé compte tenu de la grille de cotation du tableau 4.5.

Tableau 4.5. Indice de productivité Riquier

Niveau	Notation
Excellent	> 65
Bon	35-64
Moyen	20-34
Pauvre	8-10
Très pauvre	< 8

De la même manière, l'indice de potentialité (P') est calculé après avoir proposé des mesures de gestion possibles en termes de remise en état, de gestion de la fertilité et autres. Le rapport entre ces deux évaluations indique dans quelle mesure la productivité peut être améliorée. Ce rapport est appelé coefficient d'amélioration.

$$\text{Coefficient d'amélioration} = \frac{\text{Coefficient de productivité potentiel}}{\text{Coefficient de productivité actuel}}$$

Ce système n'explique pas la variabilité des rendements et il est difficile d'attribuer des valeurs à des facteurs tels que le drainage. Deuxièmement, un facteur limitant réduit considérablement l'indice de productivité. En outre, les facteurs doivent être choisis en fonction des contraintes qui affectent la croissance des cultures dans une région donnée afin d'obtenir une évaluation plus réaliste de la productivité.

Chapitre 5. Les Aspects socio-économiques

5.1. Introduction

A côté des facteurs physiques des qualités des terres sur lesquels on s'appuie pour l'évaluation qualitative, une analyse sociale et économique est nécessaire pour confirmer ou modifier leur aptitude d'un point de vue social, financier et économique.

L'analyse sociale et économique peut se faire à deux niveaux. A un niveau général, on considérera les effets d'éventuelles modifications des utilisations en fonction d'une série de facteurs qui sont, notamment, les marchés, la main-d'œuvre, les transports, la population et l'acceptabilité sociale de ces modifications. Une analyse générale de ce type doit être comprise dans toute évaluation, même qualitative. Au niveau de l'analyse économique détaillée, on étudiera les combinaisons types d'utilisations/unités de terres du point de vue économique et financier, à partir des coûts et des prix. Dans les évaluations physiques qualitatives et quantitatives, on fera cette analyse économique sous une forme simplifiée, pour vérifier que les modes d'utilisation considérés comme appropriés sont financièrement viables. Dans l'évaluation économique quantitative, l'analyse économique détaillée constitue l'une des principales activités de l'évaluation.

Dans une telle analyse économique, la première chose dont on a besoin, c'est de données fiables sur les intrants, les coûts et les prix.

5.2 Unités de mesure de l'aptitude

Trois différentes unités permettant de mesurer l'aptitude des terres. Ce sont:

- L'indice de productivité des terres, qui définit la productivité physique des terres par rapport à la meilleure terre
- Le revenu agricole net, qui se calcule en soustrayant les coûts fixes et variables de la valeur brute de la production obtenue sur une unité de terre donnée.
- L'avantage net supplémentaire résultant de l'aménagement (ANSA), qui est une mesure de l'augmentation potentielle de productivité par unité de surface mise en valeur dans le cadre d'un projet déterminé. Cette augmentation est exprimée en termes économiques, en tant que Valeur annuelle équivalente.

5.3. Analyse économique et financière

En guise d'introduction, il est nécessaire d'expliquer à l'intention du profane la différence qui existe entre analyse financière et analyse économique.

L'**analyse financière** porte sur les profits ou pertes réels, exprimés en termes monétaires, de l'exploitant ou de l'entreprise. Tous les coûts et prix utilisés dans cette analyse sont ceux qui sont effectivement payés. L'analyse financière des entreprises agricoles a pour but de vérifier si l'agriculteur (ou autre producteur, coopérative par exemple) reçoit un revenu convenable.

L'**analyse économique** porte sur le niveau de vie de la collectivité dans son ensemble, et peut tenir compte de toute une gamme de coûts et de bénéfices moins évidents, comme les subventions, les prix de soutien, les effets multiplicateurs sur l'emploi, etc. Par exemple, si le prix des engrais est subventionné dans le pays, l'analyse financière tiendra compte du prix que l'agriculteur aura effectivement payé, l'analyse économique tiendra compte également du coût de la subvention pour la collectivité.

Il y a en fait tout un éventail de possibilités depuis l'analyse purement financière, qui donne des résultats précis mais de portée limitée, à diverses formes d'analyses économiques plus globales, qui deviennent moins précises à mesure qu'elles élargissent leur champ d'action.

5.4. Considérations économiques et sociales générales

Les aspects répertoriés ci-dessous intéressent toutes les sortes d'évaluation. Ils auront été examinés lors des premières discussions, à la lumière des objectifs, hypothèses et contraintes de l'évaluation. Il faut maintenant les reconsidérer par rapport aux effets particuliers qui se produiraient si l'on modifiait l'utilisation des terres définie d'après les aptitudes physiques. Ces aspects sont notamment les suivants:

i. Marchés (locaux, régionaux, nationaux ou internationaux, selon le cas). Existe-t-il des débouchés commerciaux? Y a-t-il risque de surproduction si on propose un type d'utilisation donné sur des zones étendues?

ii. Main-d'œuvre: on examinera ici l'ensemble de la main-d'œuvre dont on dispose, compte tenu de la concurrence d'autres activités, de la croissance de l'offre de main-d'œuvre, etc. Quelles sont, parmi les cultures recommandées, celles qui exigent beaucoup de personnel (riz, oignon)? Les besoins saisonniers de pointe peuvent-ils être satisfaits?

iii. Transports: si cet aspect n'a pas été examiné pendant l'étude de la qualité « localisation », on peut examiner quels sont les moyens utilisables pour transporter les intrants depuis leurs points de livraison et les produits vers les marchés locaux ou les ports pour l'exportation. Il est utile d'ajouter l'accessibilité existante ou potentielle des terres aux aptitudes initialement établies sans tenir compte de la localisation.

iv. Population: les modifications de l'utilisation des terres influenceront généralement sur la densité de population d'une zone, quelquefois par l'installation ou le déplacement de personnes. Dans les pays en développement, la possibilité de faire vivre une population ou de coloniser des terres peut être un critère décisif concernant l'utilisation des terres.

v. Besoins de subsistance: dans les pays en développement, il faut voir si, outre la production que l'on escompte des types d'utilisation des terres, le système créé par les modifications proposées permettra de pourvoir aux besoins en bois de feu et bois d'œuvre, en pâturages, ou autres besoins de subsistance d'un village.

vi. Régime foncier: dans les zones développées et sédentarisées, les régimes juridiques de propriété ou de jouissance des terres constituent fréquemment un obstacle majeur à la planification. Dans les pays en développement, certains droits coutumiers quasi juridiques, comme les pâturages communaux, peuvent avoir des implications tout aussi importantes.

vii. Groupes minoritaires: des modifications de l'utilisation des terres peuvent nuire aux intérêts de groupes minoritaires, par exemple de populations nomades.

D'autres considérations, d'ordre politique par exemple, peuvent influencer sur les décisions finales. Bien qu'elles découlent en un sens des modifications des utilisations des terres, on peut raisonnablement penser que ces questions n'entrent pas dans le cadre d'une évaluation des terres.

5.5. Analyse coûts-bénéfices

L'analyse coûts-bénéfices (ACB) est un outil d'évaluation économique qui compare les coûts et les bénéfices monétisés d'une utilisation spécifique des terres, comme l'agriculture, l'urbanisation ou un projet de ferme solaire, afin de déterminer la meilleure option d'aménagement. Cette méthode permet d'estimer si l'utilisation proposée est économiquement viable en quantifiant l'investissement et les gains potentiels, mais elle doit être complétée par une analyse de sensibilité pour tenir compte de l'incertitude inhérente aux prévisions futures.

L'ACB aide à comparer différentes utilisations possibles pour une même terre (par exemple, agricole vs. énergétique) afin d'optimiser son potentiel, de minimiser les risques et de prendre une décision éclairée sur son aménagement.

Le processus d'analyse coûts-bénéfices pour l'aptitude des terres

1. Définir l'objectif

Déterminer l'utilisation future des terres (agriculture, développement, énergie) et définir les critères d'évaluation.

2. Identifier et quantifier les coûts

Coûts d'investissement : Dépenses pour la mise en valeur des terres (défrichage, drainage, nivellement) et les infrastructures communes.

Coûts annuels : Frais de fonctionnement et de maintenance, y compris le coût des intrants nécessaires pour l'utilisation choisie.

3. Identifier et quantifier les bénéfices

Bénéfices monétaires : Revenus générés par l'utilisation des terres, par exemple la vente de produits agricoles ou l'électricité produite par une ferme solaire.

Bénéfices non monétaires : Il est difficile de tout monétiser, mais des bénéfices comme la préservation de l'environnement peuvent être inclus.

4. Actualiser les coûts et bénéfices

Les coûts et bénéfices futurs sont actualisés à une valeur actuelle en utilisant un taux d'intérêt ou de coût d'opportunité du capital.

5. Calculer l'indicateur net

L'ACB est souvent exprimée comme une valeur actuelle nette, un ratio de bénéfice-coût, ou un taux de rendement interne.

6. Analyser la sensibilité

En raison de l'incertitude des données, il est crucial de tester comment les résultats changent face à des variations des hypothèses clés (coûts, bénéfices, taux d'actualisation).

5.6. Impacts sociaux du projet

Prise en compte des impacts potentiels sur les populations locales (emploi, accès aux ressources, etc.).

L'évaluation de l'aptitude des terres ne se limite pas aux aspects physiques (pente, drainage, sol) mais intègre aussi des considérations sociales, comme l'impact sur les communautés locales, l'équité dans l'accès aux ressources, les conséquences sur les savoir-faire traditionnels, et la préservation du patrimoine culturel lié au paysage. Elle cherche à déterminer l'usage le plus approprié pour les terres en tenant compte des besoins sociaux et des contraintes environnementales, afin de formuler des recommandations qui bénéficient aux populations.

Impact sur les communautés locales

Une utilisation des terres peut entraîner des changements sociaux, comme la migration de population, la modification des modes de vie, et l'accès aux services essentiels.

Équité sociale

L'évaluation doit veiller à ce que les bénéfices de l'exploitation des terres soient partagés équitablement et que les communautés locales n'en soient pas désavantagées, notamment en ce qui concerne la perte de terres ou de ressources.

Préservation des savoir-faire et du patrimoine

L'évaluation doit prendre en compte les savoirs traditionnels des communautés sur l'utilisation de la terre et l'importance culturelle des paysages.

Participation communautaire

Impliquer les communautés dans le processus d'évaluation permet d'assurer que leurs besoins et préoccupations sont pris en compte.

Développement économique et social

L'évaluation peut identifier des usages des terres qui créent des opportunités économiques et améliorent le bien-être des populations locales, par exemple par le développement de projets agricoles ou de services.

5.7. Intégration des aspects sociaux dans le processus d'évaluation

1. Identification des objectifs sociaux

Comprendre les objectifs de développement et les besoins des communautés qui seront affectées par la modification ou l'utilisation des terres.

2. Analyse des impacts potentiels

Évaluer les conséquences sociales des différents scénarios d'utilisation des terres, qu'ils soient positifs ou négatifs.

3. Approche interdisciplinaire

L'évaluation doit impliquer des experts de diverses disciplines (agronomie, géographie, sociologie, économie) pour une compréhension complète des enjeux.

4. Formulation de recommandations

Le résultat de l'évaluation doit inclure des recommandations d'utilisation des terres qui sont socialement viables et bénéfiques, et qui minimisent les effets négatifs sur les populations.

En somme, une évaluation complète de l'aptitude des terres doit considérer l'ensemble des facteurs, y compris les dimensions sociales, pour garantir une utilisation durable et juste des ressources foncières.

Chapitre 6. Présentation des Résultats:

La présentation des résultats de l'évaluation de l'aptitude des terres se fait via des cartes et un rapport.

Les cartes montrent les différentes classes d'aptitude, accompagnées d'une légende claire expliquant les limitations et les possibilités d'amélioration pour chaque type d'utilisation des terres.

Le rapport détaille les études de base, les recommandations d'aménagement, et des analyses socio-économiques, en expliquant les classes d'aptitude et les systèmes d'utilisation des terres suggérés.

6.1. Contenu des résultats

- **Cartes d'aptitude des terres**

Ces cartes sont le principal outil de communication et doivent être autonomes, avec une légende complète expliquant les classes d'aptitude et leurs limitations.

Elles peuvent inclure des informations sur les zones de protection, les zones à bonifier, et les sites potentiels pour des projets comme l'irrigation, selon l'échelle de l'étude.

- **Rapport d'évaluation des terres**

Le rapport fournit des informations plus détaillées sur les études de base (climat, sols, etc.).

Il explique les classes d'aptitude des terres (comme S1, S2, S3, etc.) et les types d'intrants et d'améliorations nécessaires pour chaque classe.

Il inclut des recommandations d'aménagement du territoire et, dans certains cas, des analyses socio-économiques pour aider à la prise de décision.

6.2. Objectif de la présentation

- **O1. Faciliter la planification**

Les résultats servent de base pour décider des modes d'utilisation les plus rationnels des terres en fonction de leurs caractéristiques physiques et de leurs contraintes.

- **O2. Identifier les opportunités et les défis**

La présentation met en évidence les terres les plus productives et celles qui nécessitent des investissements importants en drainage, irrigation, ou autres améliorations pour atteindre une certaine productivité.

- **O3. Soutenir les décisions d'aménagement**

Les informations fournies aident à évaluer la faisabilité de différents projets et à choisir les options les plus appropriées en fonction des besoins et des capacités d'une région donnée.

6.3. Exemple de table de matière du rapport d'EAT

Préface

Résumé des conclusions et des recommandations

Chapitre 1 - Objectifs de l'étude

- Bases économiques actuelles
- Problèmes présents et futurs et besoins de développement
- Etudes antérieures, données existantes
- Origines de la présente étude
- Objectifs

Chapitre 2 - l'environnement physique

- Climat, hydrologie, géologie, géomorphologie, sols, végétation, aspects particuliers

Chapitre 3 - l'environnement humain

- Population et peuplement
- Infrastructure et services
- Contexte social (par exemple, régime foncier)
- Agriculture et utilisation des terres actuelles: par exemple: cultures vivrières, cultures de rapport, élevage, sylviculture, etc.

Chapitre 4 - Méthodologie

- Description de l'évaluation (calendrier, personnel, méthodes, etc.)
- Etudes de base des ressources en terres (s'il y a lieu)
- Prospections sur le terrain : par exemple: études des systèmes d'exploitation/agricoles, études des rendements agricoles, enquêtes sociologiques, enquêtes économiques, etc.
- Analyse et interprétation des données

Chapitre 5 - Types d'utilisation des terres

- Méthodes utilisées pour définir les types d'utilisation des terres
- Différentes parties de la description
- Types d'utilisation des terres: TUT A, TUT B, TUT C, etc. (y compris tableaux récapitulatifs)

Chapitre 6 - Unités de terre

- Méthodes utilisées pour définir les unités de terre
- Différentes parties de la description

- Unités de terre: UT 1, UT 2, UT 3, etc. (y compris tableaux récapitulatifs).

Chapitre 7 - Exigences des utilisations des terres et qualités des terres

- Exigences des utilisations des terres: méthodes de détermination, de sélection et de classement

- Besoins des cultures et des types d'utilisation des terres (avec des tableaux)

- Qualités des terres: méthodes d'estimation

- Qualités des terres des unités de terre (avec des tableaux)

- Données sur les rendements agricoles.

Chapitre 8 - Aptitude des terres

- Compatibilité: confrontation entre les exigences des utilisations des terres et les qualités des terres

- Améliorations des terres (s'il y a lieu)

- Incidences sur l'environnement (peuvent aussi être traitées plus loin, dans un chapitre à part)

- Analyse économique et sociale (considérations générales)

- Classification des aptitudes des terres

Ordres et classes d'aptitude des terres ; Sous-classes d'aptitude des terres ; Unités d'aptitude des terres (si elles sont utilisées)

Chapitre 9 - Evaluation économique

(Si une classification économique des aptitudes des terres a été employée, les résultats des enquêtes économiques détaillées seront présentés dans un chapitre distinct).

Chapitre 10 - Recommandations

- Systèmes d'utilisation des terres recommandés (avec différentes possibilités)

- Mesures d'aménagement

- Estimation des extrants et des autres avantages

Annexes (présentées dans un volume à part pour une étude de grande portée).

par exemple :

- Données agroclimatiques et analyse

- Données pédologiques et analyse

- Données économiques et analyse etc.

Glossaire

Annexes

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- Boyer J. 1982. Les sols ferrallitiques. Tome X. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Initiations Documents techniques n°52, ed. ORSTOM Paris. 384p.
- [2]- Dalal-Clayton B., Dent D. 1993. Surveys, plans and people. *Sustainable Development*, (3).
- [3]- FAO. 1976. Cadre pour l'évaluation des terres. Bulletin pédologique n°32
- [4]- FAO. 1988. Directives: évaluation des terres pour l'agriculture pluviale. Bulletin pédologique n°52
- [5]- FAO. 1989. Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: directives, Bulletin pédologique n°55
- [6]- Fardeau J. C. 2015. Des indicateurs de la fertilité des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 22: 77 - 100.
- [7]- GESSOL. 2002. Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide. Rapport final, 177p
- [8]- Gros R. 2002. Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origine anthropique : réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique. Thèse de doctorat, Ecology, environment. Université de Savoie, 243p
- [9]- Karlen D. C., Mausbach M. J., Doran J. W., Clire R. G., Harris R. F., Schuman G. E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of American Journal* 61:4-10.
- [10]- Manikandan, K., Kannan, P., Sankar, M., Vishnu, G. 2013. Concepts on land evaluation. *Earth Science India (Popular Issue VI (I))*, 20-26.
- [11]- Riquier J., D., Bramo D. L., Cornet J. P. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (AGRL/TESR/70/6), FAO, Rome.
- [12]- Storie R. E. 1978. The Storie index soil rating revised. Spec. Publ. Div. Agric. Sci. Univ. of California, Berkeley, No. 3203.
- [13]- Sys C., Van Ranst E., Debaveye J., Bernaert F. 1993. Land Evaluation. Part III: Crop requirements.
- [14]- Sys C., Van R., Debaveye J. 1991. *Land evaluation: principles in land evaluation and crop production calculations*. General Administration for Development Cooperation.