

Caractéristiques biologiques des sols

1.- Ecologie

L'écologie (*oikos* : habitat, *logos* : discours) est la science du rapport entre les organismes et leur environnement organique et inorganique (GOMBERT, 2007). La condition écologique est déterminée par l'écosystème, les facteurs écologiques et les systèmes d'interaction. Parmi ceux-ci, les facteurs écologiques jouent un rôle important et comprennent deux sous-facteurs : biotique (interaction entre les organismes) et abiotique (climatique, topographique, édaphique, etc.). Ces éléments affectent la formation et l'évolution du sol (sols zonaux et azonaux), mais également la biocénose (ensemble des organismes vivants). Les plantes ont besoin d'énergie, d'eau, d'air, d'éléments minéraux (N, P, K⁺, etc.) et d'oligoéléments puisés dans le sol pour l'élaboration de la matière sèche (MS) en quantité et en qualité. L'absence de l'un de ces éléments peut constituer un facteur limitant selon la Loi de Liebig (FAO, 2007). Les facteurs écologiques dépendent entre autres de la localisation géographique (latitude et altitude) et du microclimat (GOMBERT, 2007).

2.- Sols

La formation d'un sol peut se décomposer en trois étapes qui se chevauchent dans le temps et dans l'espace : (i) altération de la roche-mère, (ii) humification, (iii) différenciation. La pédogénèse résulte de plusieurs processus physiques, chimiques et biologiques étroitement corrélés entre eux (GERASSIMOV, 1975 ; DUCHAUFOR, 1984). Le sol est un milieu complexe constitué par trois formes principales : solide, liquide et gazeuse. Il est traversé par des flux d'énergie et de matières dont la régulation est en grande partie assurée par les communautés vivantes qui le colonisent (DJIGAL, 2003). En outre, les sols constituent une ressource essentielle mais non renouvelable à l'échelle humaine (SOUSSANA, 2012).

Caractéristiques physiques des sols

Le sol est composé de trois particules minérales qui représentent de 93 % à 95 % de sa masse totale : sable, limon et argile (CALLOT *et al.*, 1982). Ces particules sont classées en fonction de leur taille. Selon le système de classification de CANSYS et USDA cité par HENIN *et al.*, (1972) : les argiles sont des particules qui ont un diamètre inférieur à 0,002 mm, les limons 0,002 mm-0,05 mm et les sables 0,05mm-2mm.

La structure est le regroupement des particules primaires du sol, de taille et de forme différente (LAVELLE et SPAIN, 2001). La structure du sol est le résultat de plusieurs facteurs : climatiques, anthropiques et biologiques (OADES, 1993 ; LAVELLE et SPAIN, 2001). Selon sa structure le sol conditionne : (i) le développement racinaire, (ii) le mouvement de l'eau et des minéraux et (iii) l'activité des organismes en relation avec la MO.

2.2.- Caractéristiques chimiques des sols

La Capacité d'Echange Cationique (CEC) et le potentiel hydrogène (pH) sont les principaux paramètres chimiques caractérisant un sol. La CEC est la quantité de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné. Elle correspond au nombre de sites négatifs dans la matrice du sol où peuvent être stockés les principaux cations (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et NH_4^+). La valeur de la CEC est fonction de la richesse en argile et en MO. Le pH mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+). Les plantes tropicales ont une tolérance en pH allant de **4,5 à 7,5** (MOREAU, 1986).

Les éléments minéraux présents dans le sol constituent des sources nutritives pour les plantes. Leur biodisponibilité dépend de la CEC et du pH du sol (DABIN, 1968 ; MING et SHIWEI, 2017). Ces minéraux contribuent à l'élaboration de la matière sèche (FAO, 2007) :

- l'azote (N) joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes. C'est un composant essentiel de la matière vivante. Il s'agit d'un facteur de croissance et de qualité (teneur en protéines).
- le phosphore (P) intervient dans les transferts énergétiques (ATP), dans la transmission des caractères héréditaires (acides nucléiques), la photosynthèse et la dégradation des glucides. Cet élément est essentiel pour la floraison, la nouaison, la précocité, le grossissement des fruits et la maturation des graines.
- le potassium (K^+) joue un rôle important dans le développement racinaire, l'absorption des cations, l'accumulation des hydrates et des protéines, l'activation des enzymes de la photosynthèse, le maintien de la turgescence de la cellule et également la régulation de l'économie en eau de la plante. Il participe à l'amélioration de la qualité des fruits et des graines.
- le calcium (Ca^{2+}) est un constituant essentiel des membranes cellulaires ; il joue également un rôle dans la division cellulaire et dans le maintien de la structure des chromosomes. Il est un activateur important d'enzymes.

- le magnésium (Mg^{2+}) est un constituant de la chlorophylle, il joue ainsi un rôle important dans la photosynthèse. Il favorise la mobilité des sucres et du phosphore dans la plante et est aussi un activateur important d'enzymes.

2.3.1.- Matière organique morte

Le sol est composé de MO inerte, il s'agit des organes végétaux morts, des cadavres des faunes et flores dans tous les stades de fragmentation et de décomposition (LAVELLE et SPAIN, 2001). La MO morte présente plusieurs formes en fonction du rapport C/N :

- (i) C/N faible : fraction organique labile, facilement décomposée par les organismes du sol (les exsudats racinaires et les mucus des vers de terres) ;
- (ii) C/N moyen : fraction organique légère (litières des feuilles, MO décomposée) ;
- (iii) C/N élevé : fraction organique lourde, constituée par des substances humiques stables et qui forment le complexe argilo-humique. Elles proviennent de la dégradation des matériaux lignifiés.

La présence de ces différentes fractions dans le sol lui confère son niveau de fertilité et de stabilité (FELLER, 1995 ; BALESSENT, 1996).

2.3.2.- Fraction organique vivante

Biomasse racinaire : Elle représente une part importante de MO du sol. Elle génère une vie sous-terrainne active à travers l'énergie et les produits qu'elle génère (glucides, acides aminés, ...) [BARDGETT et GRIFFITHS, 1997 ; CHANTIGNY et ANGERS, 2005].

Pédofaune fonctionnelle du sol : C'est un groupe d'invertébrés classés en trois catégories selon leur taille (BACHELIER et *al.*, 1963) :

- microfaune : de taille inférieure à 0,2mm (nématodes et protozoaires), ce groupe a un rôle important dans la régulation des microorganismes du sol (BRUNEL, 2006) et contribue à la minéralisation des nutriments (FERRIS et *al.*, 1998 ; EKSCHEMITT et *al.*, 1999 ; DJIGAL, 2003 ; EGLIN, 2010).
- mésofaune : de taille comprise entre 0,2 à 4mm, composée par les microarthropodes (collembolles, acariens), les enchytréides et les petits myriapodes (BACHELIER, 1978), ce groupe intervient dans la fragmentation de la MO en décomposition.

- macrofaune et mégafoane (taille supérieure à 4mm) : ce groupe est constitué essentiellement par les vers de terre et les insectes (BACHELIER, 1978 ; LAVELLE et *al.*, 1990). Il intervient dans la décomposition et la distribution spatiale de la MO dans le sol et active la libération des éléments minéraux (MATTSON, 1977 ; JONES et *al.*, 1994 ; EDWARDS et BOHLEN, 1996 ; EGLIN, 2010).

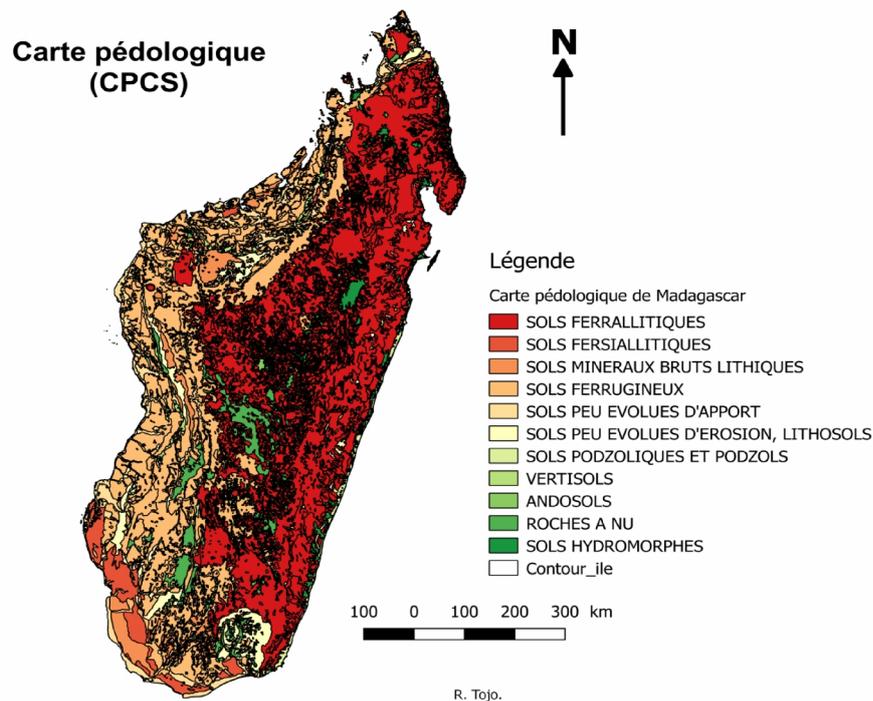
Microflore microbienne fonctionnelle du sol : ce groupe est composé par les virus, les bactéries, les actinomycètes et les champignons (LAVALLE et SPAIN, 2001 ; EGLIN, 2010). Ces microorganismes assurent la dégradation et la minéralisation de l'humus et des fractions labiles, dont les plus importants sont le cycle de l'azote (N), du carbone (C) et du phosphore (P), (EGLIN, 2010). Ils apportent d'important flux d'énergie dans le sol (BAKKEN, 1997 ; TOOP et *al.*, 1997) et agissent dans la régulation de la communauté, via des interactions mutualistes ou antagonistes avec les autres organismes. Ils interviennent également dans l'agrégation des particules du sol (TISDALL et OADES, 1982 ; CHANTIGNY et ANGERS, 2005).

- Les bactéries sont de procaryotes unicellulaires de forme très variée (bâtonnets, cocci, bacilles, etc.), de petite taille comprise entre 0,3 à 3µm. Leur classification est basée sur la structure de leur paroi cellulaire, leur mobilité, leur forme et leur mode de nutrition.
- Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses hétérotrophes, disposant d'un mycélium ramifié plus fin. Certaines espèces symbiotes sont fixatrices d'azote et dotées de propriétés antibiotiques (STOLP, 1988 ; NORMAND et *al.*, 2000).
- Les champignons sont des eucaryotes caractérisés par une structure filamenteuse végétative appelée mycélium. Ils sont abondants dans les sols (SHIELDS et *al.*, 1973). Plusieurs espèces symbiotes comme les mycorhizes présentent des intérêts agronomiques intéressants.

2.4.- Sols de Madagascar

2.4.1.- Classification des principaux sols de Madagascar

Madagascar se trouve entre 12° et 25° de la latitude Sud, caractérisé par un climat chaud et humide dans la zone littorale Est, chaud et subhumide sur les Hautes Terres Centrales (HTC), chaud avec saison sèche prolongée dans la partie Ouest et aride dans le Sud. Cette variabilité climatique est à l'origine de la variabilité pédologique décrite par divers scientifiques (RIQUIER, 1957, 1966 ; HERVIEU, 1960, 1967 ; BOURGEAT et *al.*, 1964, 1995).



Carte 2 : Pédologie de Madagascar selon CPCS, DELENNE et PELLETIER (1981)

D'après la Commission de Pédologie et de Classification des Sols (CPCS), les sols de Madagascar se répartissent en douze classes sur la base de processus de pédogénèse et de description du profil. Les quatre premières grandes classes sont énumérées dans le cadre de cette recherche vu leur importance agricole liée à la zone d'étude :

- 46,5% de la superficie totale sont occupées par les sols ferrallitiques, caractérisés par un profil très développé, riche en argile de type kaolinite (CEC faible et pH fortement acide). Ils couvrent la Haute Terre Centrale (HTC) et la partie humide orientale.
- 27,8% du territoire composés de sols ferrugineux, couvrent la partie Ouest et Moyen Ouest de l'île ; le pH est légèrement acide.
- 6,4% sont formés par les sols peu évolués d'apport et 4,2% par les sols peu évolués d'érosion. Les sols peu évolués sont des sols légers de profil peu développé constitués par deux horizons superposés A et C (GRINAND *et al.*, 2009).

2.4.2.- Occupation des sols cultivés de la région Sud-Est de Madagascar

La valorisation des sols Malagasy est très diversifiée, selon les terroirs, les typologies et les zones agro-écologiques. Le bas-fond est saturé par la riziculture tandis que le tanety est sous

exploité à cause de la fertilité médiocre. Les sols de type Baiboho (sol peu évolué d'apport ou d'érosion) sont les plus exploités à cause de leurs caractéristiques agronomiques intéressantes. Dans la partie Sud Est de la Grande Île, les sols peu évolués sont consacrés à la culture vivrière et de rente, en particulier les caféiers et bananiers (RANDRIANAIVO et RASOLO, 1989). La plantation se développe aussi bien sur les collines que sur les bas de pente dénommés «Joloky ou Kombohitra». Il s'agit d'un système agroforestier traditionnel, étalé sur une petite superficie de 0,2 à 2ha, caractérisé par un faible apport d'intrants (MESSERLI, 2003 ; RAKOTOARIVELO, 2005 ; JOMONIS, 2015).

3.- Les caféiers

Le caféier est une plante arbustive adaptée à la zone tropicale. Les différents processus de traitement de ses graines aboutissent à la production d'un breuvage dit "café-boisson".

3 1.- Morphologie

– Partie souterraine :

Le système racinaire est constitué par un pivot (fonction d'ancrage et d'alimentation hydrique) qui peut atteindre jusqu'à 1,5m de profondeur. Les ramifications latérales très denses (fonction de nutrition) représentent 80% des biomasses racinaires et se trouvent dans l'horizon superficiel du sol (HATERT, 1958).

– Partie aérienne :

Le tronc, axe monopodiale orthotrope allant de 4 à plus de 10m de haut, supporte les rameaux opposés. Les feuilles sont opposées deux à deux sur les nœuds des tiges orthotropes et plagiotropes. Les fleurs blanches odorantes groupées en glomérules se trouvent à l'aisselle des feuilles des branches plagiotropes. Les fruits sont des drupes ovales de couleur vert, rouge ou jaune à maturité selon les espèces ; ils sont constitués d'un exocarpe, d'un mésocarpe charnu blanc-jaunâtre et de deux graines accolées par leur face plane. Les graines, protégées par un endocarpe de couleur grisâtre, sont caractérisées par une placentation dite «cafféenne », matérialisée par la présence d'un sillon, plus ou moins invaginé, dans la partie ventrale de l'albumen.

3.2.- Classification

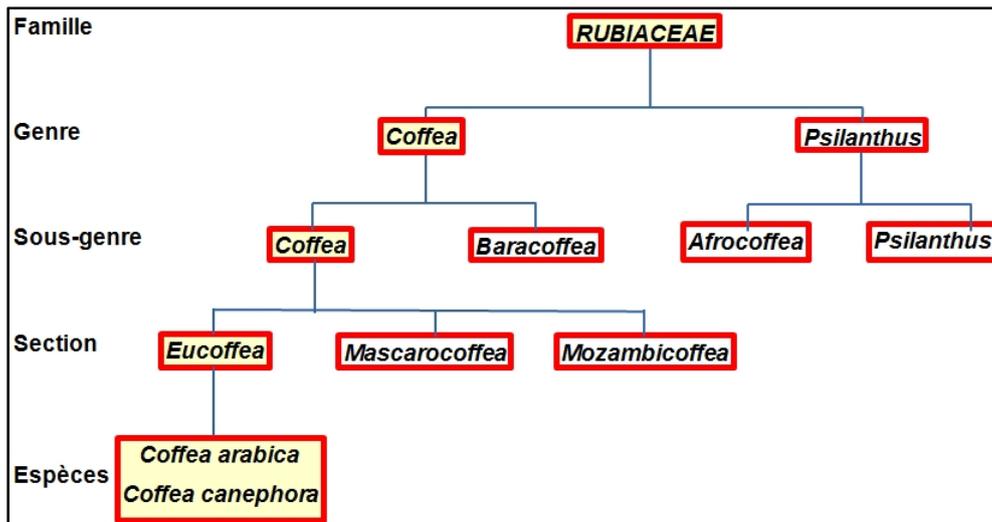


Figure 8 : Classification des caféiers, selon DAVIS (2011)

Les caféiers appartiennent à la famille des *RUBIACEAE*. Ils se répartissent en deux genres : *Coffea* et *Psilanthus*. Le genre *Coffea* est subdivisé en deux sous-genres : *Coffea* et *Baracoffea*, tandis que le genre *Psilanthus* est scindé en deux sous-genres : *Afrocoffea* et *Psilanthus*. Le sous-genre *Coffea* regroupe la majorité (79%) des espèces connues. Selon DAVIS (2011), les deux genres représentent au total 124 espèces. Les espèces du sous-genre *Coffea* sont regroupées en trois sections :

- *Eucoffea* : caféiers spontanés de l’Afrique centrale et occidentale regroupant les espèces les plus cultivées dans le monde (*C. arabica* et *C. canephora*) ;
- *Mozambicoffea* : caféiers de l’Est africain à basse teneur en caféine ;
- *Mascarocoffea* : espèces sauvages de Madagascar, des îles Mascareignes et des Comores. Leurs graines sont généralement dépourvues de caféine. Ils se subdivisent en six séries botaniques : *Garcinioides*, complexe *Milotii*, *Multiflorae*, *Subterminales*, *Verae* et *Humblotianae-Mauritiana* (CHARRIER, 1978).

3.3.- Espèces cultivées

3.3.1.- *C. arabica*

C’est un arbuste originaire d’Ethiopie, à feuillage persistant de 4 à 6m de haut, avec un port semi-érigé (COSTE, 1989). Les feuilles sont lisses, ovale, légèrement gaufrée de taille allant de 10 à 15cm de long. *C. arabica* est tétraploïde ($2n = 44$ chromosomes) et autogame

(LOUARN, 1972). Les cerises sont de couleur rouge ou jaune à maturité. La granulométrie est généralement élevée. Cette espèce procure un café-boisson apprécié à arôme fin.

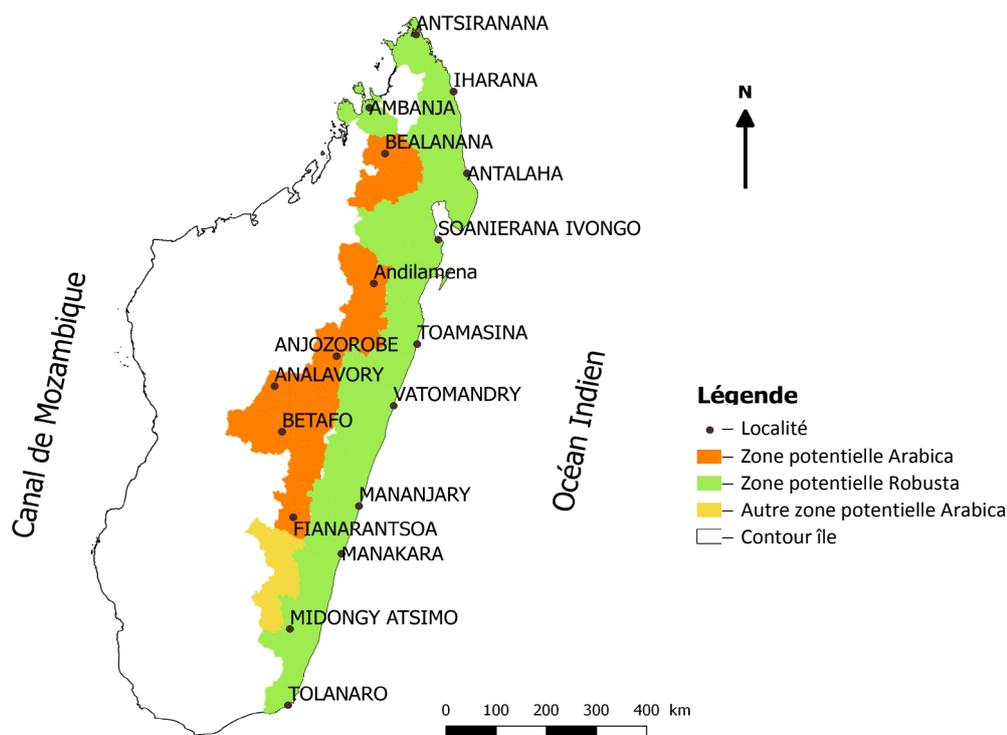
3.3.2.- *C. canephora*

Cette plante originaire de l’Afrique occidentale et centrale est un arbuste à feuillage persistant atteignant jusqu’à 10m de hauteur. Les feuilles de forme oblongue, à relief gaufré, sont plus grandes que celle de l’Arabica (20 à 30cm de long, 8 à 15cm de large). C’est une espèce diploïde ($2n = 22$ chromosomes) et allogame. Les cerises sont rouges à maturité. Les graines sont de taille variable, mais généralement petite.

Tableau 12 : Caractéristiques des deux espèces les plus cultivées d'après COSTE (1989)

Caractères	<i>C. arabica</i>	<i>C. canephora</i>
Cycle de fructification (j)	210-230	270-360
Ratio graine/fruit (%)	20-26	17-24
Poids de 100graines	12-28	17-26
Taux caféine (%MS)	0,9-1,2	1,5-2,5
Arôme	forte	faible
Amertume	faible	forte

3.3.3.- Répartition spatiale de la caféiculture à Madagascar



Carte 3 : Zones caféicoles à Madagascar

Auteur, 2018.

C. arabica est l'espèce la plus cultivée dans le monde. Elle est par contre très faiblement développée à Madagascar (<5%) et se concentre sur les Hautes Terres Centrales (HTC). *C. canephora* est la plus cultivée (>95%). Les plantations sont réparties sur la littorale Est et dans le Sambirano.



C. arabica (DRA Ambatobe)

Graines en parches et déparchées (*C. arabica*)

Planche 10 : *Coffea arabica*

Auteur, 2018



C. canephora (à Tsarahafatra)

Graines en parches et déparchées (*C. canephora*)

Planche 11 : *Coffea canephora*

Auteur, 2018

3.3.4.- Ecologie

3.3.4.1.- Facteurs climatiques

Les facteurs du climat exercent beaucoup d'influence sur le développement des caféiers. Les conditions écologiques exigées par les deux espèces sont comparées dans le tableau 13. Les sites ombragés ou semi-ombragés sont les milieux propices aux caféiers (KUMAR et TIESZEN, 1980 ; COSTE, 1989 ; DA MATTA, 2004). Cependant, la culture intensive à canopée ouverte a une influence positive sur les facteurs de production (photosynthèse, maturation des grains et production), mais sous condition d'apport élevé en fertilisants et de soins culturaux intensifs (MORAIS et *al.*, 2006 ; VAAST et *al.*, 2008 ; AUDEBERT, 2011). Le vent dominant entraîne la défoliation et dessèche les rameaux. Il détériore le rendement et la qualité du produit.

Tableau 13 : Conditions écologiques favorables aux deux espèces cultivées (COSTE, 1989)

Conditions écologiques	<i>C. arabica</i>	<i>C. canephora</i>
Altitude (m)	700-1800	<700
Saison sèche (mois)	4 à 5	<2
Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	1500	>2000
Hygrométrie (%)	>60	>80

3.3.4.2.- Facteurs édaphiques

Les caféiers prospèrent bien sur plusieurs types de sol : argilo-siliceuse, volcaniques, colluvionnaires ou alluvionnaires. Une texture équilibrée et profonde permettent aux systèmes racinaires de se développer. Les sols caillouteux et compact sont défavorables aux caféiers. Le niveau de la nappe phréatique inférieure à 1m limite le développement de la partie souterraine. Selon différents auteurs le niveau des éléments dans les sols à caféier est normal lorsqu'ils correspondent aux valeurs présentées dans le tableau 3.

Les caféiers s'accommodent aux sols acides et riches en MO. L'azote (N) et le potassium (K) biodisponibles dans les sols sont vitaux pour la culture. La constitution des graines et coques (tableau 14) montre que ces deux éléments majeurs (N, K) sont les plus exportés, suivis par les autres bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et le soufre (S).

Tableau 14 : Sol idéal pour les caféiers

Eléments	CASS (2014)	Cirad-cp (1998)
pH	>5	5,3-6,5
C %	>1,7	4-9,9
N total (%)	>0,15	2-4,9
P ass. ppm (BRAYII)	>15	7 à 20
Ca méq %	>2	5,0-9,9
Mg méq %	>2	0,6-0,9
K méq %	>0,3	0,2 à 0,59
Matière organique	>3	6,9 – 17,1

CASS : Consortium africain de la santé des sols ; cp : culture pérennes ; ass. : assimilable ; ppm : partie par million.

Tableau 15 : Analyse des grains et coques de *C. arabica*,

Eléments	1kg de graine	1kg de coque
N	16,6	17,5
P	1,1	1,4
K	15,3	37,4
Ca	2,8	4,2
Mg	1,6	1,2
S	1,3	1,6

Source : MALAVOLTA cité par COSTE (1989).

3.3.5.- Physiologie

Le stade de végétation commence par la germination de la graine et dure environ de 4 à 7ans. Le caféier peut vivre jusqu'à 50-80 ans, moyennant des rajeunissements physiologiques périodiques (taille). La multiplication peut se faire par voie générative et végétative (clones). De préférence le semis s'effectue tôt après le traitement post récolte par voie humide afin d'éviter la perte du pouvoir germinatif. Les tiges orthotropes non aoutées peuvent être multipliées par bouturage. La condition optimum pour la germination ou le bouturage est sous une température moyenne de 30° sans trop d'écart de température diurne, dans un milieu humide et aérée. La transplantation s'effectue à partir du stade 5 à 6 paires de feuilles sur des parcelles préalablement fertilisées et ombragées.

A partir de trois ou quatre ans, le rapport entre le système aérien et racinaire détermine un équilibre de flux hormonal (auxines-gibberellines-cytokinines), déclenchant la floraison (COSTE, 1989). La floraison est provoquée par une pluie déclencheuse de 10 à 35 mm

précédée d'une période sèche. La dissémination des pollens est assurée par le vent et les insectes ou par gravitation après l'éclosion des fleurs. La forte pluie ou sécheresse peuvent avoir un effet néfaste sur la pollinisation. La maturation des fruits après la fécondation varie selon les espèces, les variétés, les conditions climatiques et la pratique culturale. La production est fonction de plusieurs paramètres : hérédité, âge physiologique, condition écologique, conduite culturale etc...

3.3.6.- Contexte de la production caféière à Madagascar

Les efforts menés par les colons ont contribué à l'augmentation croissante de la production caféière à Madagascar. Un effort d'extension et d'amélioration a été entrepris en 1953 pour maintenir la qualité de production liée au vieillissement de la plantation.

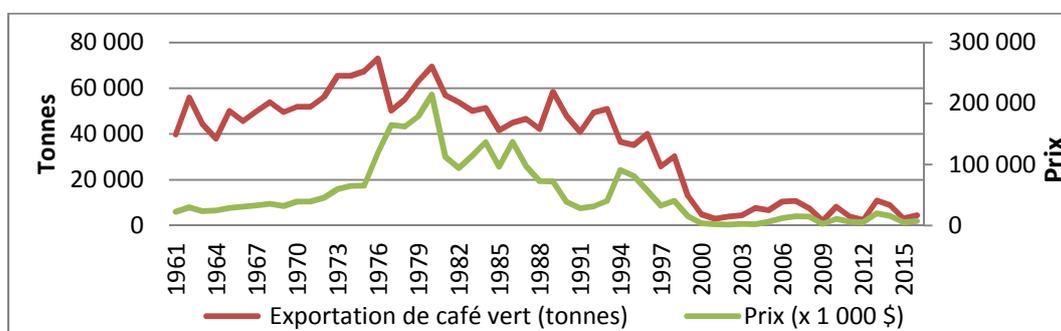
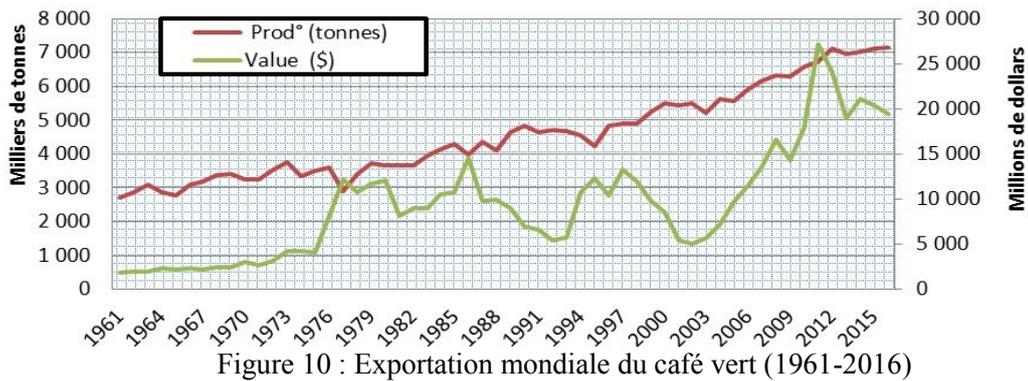


Figure 9 : Exportation de café vert de Madagascar (1961-2016)

Source : <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>

En 1961, l'Etat a mis en place la Caisse de Stabilisation du Prix du Café (CSPC) afin de préserver la filière. La vulgarisation et l'encadrement par "l'Opération Café" jusqu'à la fin des années 80 a permis une remarquable amélioration quantitative et qualitative de la production essentiellement en Robusta. L'exportation d'environ de 120t en 1912 (RAMILISON, 1985) a frôlé son record de 72 960t en 1976 (FAOSTAT, 2018). La production totale a chuté à partir des années 1990 (figure 9) suite à la dissolution de la CSPC. L'exportation est la plus touchée avec un niveau très bas de 4485t en 2016 (FAOSTAT, 2018). De même, la qualité de la production s'est dégradée à cause du vieillissement des caféraies et du manque de soins culturels. La grande île est détrônée parmi les exportateurs pour se classer au 50^{ème} rang en 2017 (Douane Malagasy, enquête personnelle 2018). Inversement, la production mondiale a été multipliée par 2,6 durant les 50 dernières années avec la montée en puissance des nouveaux pays producteurs d'Asie (Vietnam, Indonésie, Inde). Elle est passée de 2 726 000t (1961) à 7 163 000t (2016) selon la FAOSTAT (2018).



Source : <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>

Le cours du caféier est instable. Son allure en dent de scie (figure 11) est néfaste pour les acteurs de la filière en l'absence de la politique de stabilisation de prix et de gestion de la filière. Pour le cas de Madagascar, le prix le plus bas ces 50 dernières années est de 0,29\$ US le kg (café vert) en 2004 alors qu'il était de 3,28 \$ US en 1977. En 2016, selon FAOSTAT (2018) le prix du kg du café Malagasy est de 1,62\$ le kg contre 2,71\$ pour le cours mondial du fait de la dévaluation du Robusta, par rapport à l'Arabica qui inonde le marché international.

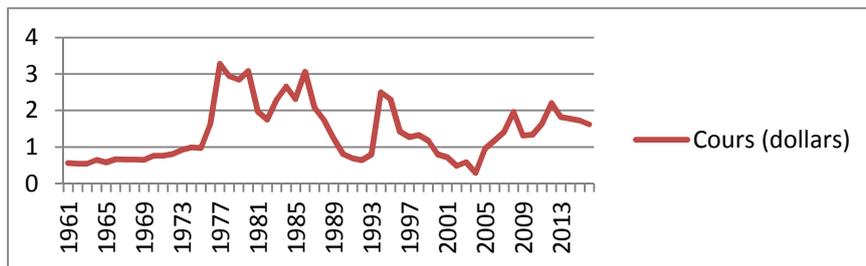


Figure 11 : Courbe de fluctuation du prix (\$) du Robusta de Madagascar (1961-2016)

Source : <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>

La fluctuation des prix du produit dé motive les cultivateurs à porter soins à leur plantation. Néanmoins, la diversification des cultures avec les vivriers se répand pour accroître leur résilience (ALBRECHT et KANDJI, 2003). Malgré tout, la mauvaise gestion de la fertilité des sols, conséquence d'une pratique culturale archaïque tarit vite les ressources et se répercute sur la qualité et la quantité des produits obtenus.