

Les trajectoires technologiques de la bioéconomie de la canne au Brésil ou la construction institutionnelle d'avantages compétitifs par la valorisation durable du capital naturel

Edouard Lanckriet

Agrosolutions

Ingénieur Agronome

Docteur en socio-économie du développement

Table des matières

Abstract	2
Introduction.....	3
I - Fin XIX ^{ème} , La filière éthanol émerge en réponse aux crises des prix du sucre	3
II – 1975, Création d'un programme de soutien massif à l'éthanol : le Proalcool.....	7
1 ^{ère} Phase du Proalcool, 1975-1979, stimulation de l'offre, et création d'un marché garanti.	8
2 ^{ème} phase du Proalcool, 1979-1985 : stimulation de la demande	9
III - Après le Proalcool une décennie de crise pour les filières éthanol	12
IV - 2003, le virage du Flex-fuel et le développement de la filière bioélectricité	12
V - 2007, Le Brésil en leader rêvé d'un OPEP vert ou les raisons du virage agroécologique	18
VI – Années 2010, une transition qui se cherche	22
VII – 2020, RenovaBio : poursuite d'une trajectoire d'innovation bioindustrielle ?	25
Conclusion	27
Bibliographie	28

Abstract

Au Brésil, la canne à sucre fournit environ 17% du mix énergétique national, 45% des véhicules fonctionnent avec du bioéthanol de première génération et 10% de l'électricité est issue de la combustion des résidus de canne. Ce développement est le fait d'une longue histoire d'innovations technologiques dont les trajectoires sont façonnées par les luttes d'influences entre groupes de pression sociaux, politiques et industriels, finalement orientées par leurs compromis pour répondre aux enjeux toujours changeants du développement du pays. Nous analysons l'histoire et les conditions socio-politiques du succès de cette bioéconomie, ainsi que les défis qui subsistent à l'accomplissement des derniers cycles d'innovation indispensables à la pérennité du système, à son ancrage dans une durabilité forte.

L'histoire de cette bioéconomie est celle d'une véritable saga industrielle. Initialement érigées en outil de régulation des cours du sucre dans un contexte économique extrêmement planifié, les agroénergies sont - dans un second temps - financées sur fonds publics au motif de leur intérêt stratégique national pour la sécurité énergétique. Passé le temps de l'apprentissage industriel et dans un contexte de pétrole haussier, elles deviennent compétitives avec les énergies conventionnelles, le Brésil se rêve alors en leader d'un OPEP vert et ambitionne d'inonder les marchés internationaux d'éthanol « durable ». Mais les marchés occidentaux ciblés imposent le respect de critères environnementaux qui poussent le pays à envisager un mode de production agroécologique intensif de la canne à sucre. L'essor des bioindustries de la canne a permis de structurer au Brésil un système d'innovation qui a acquis au fil du temps la maîtrise de ses trajectoires technologiques, il prend en charge ce dernier virage qui nécessite de réinventer un modèle agricole et ses outils. L'enjeu est de taille, développer une industrie en puits de CO₂, régénératrice des sols tropicaux, productrice nette de capital naturel : la première véritable bioindustrie en somme. Cependant la nature exogène de la motivation de ce changement en est également le talon d'Achille. Depuis la fin du XIX^{ème}, le Brésil est à 3 reprises parvenu à organiser des révolutions technologiques qui ont métamorphosé son paysage industriel au profit d'une part toujours croissante d'industries biosourcées. Mais le pays peine à véritablement entrer dans ce dernier cycle d'innovation. Les freins à cette transition sont multiples, l'érosion de la hausse des cours du pétrole mais aussi l'absence de véritable valorisation économique des produits à externalités environnementale sur les marchés internationaux. La gouvernance du modèle brésilien est également devenue plus complexe, métamorphosé par la mondialisation de ses capitaux et l'éclatement de ses intérêts industriels, il est paradoxalement moins coopératif au moment où il peut servir un bien commun que lorsqu'il servait les intérêts nationaux brésiliens.

Les enseignements du modèle brésilien permettent d'éclairer nombre de questions courantes du développement des bio-industries : la place de l'innovation, technologique comme politique pour l'affirmation de systèmes techno-industriels en compétition avec les systèmes conventionnels dominants ; les nécessaires arbitrages de politique économique pour protéger ces filières de leur fragilité structurelles, prises en étau entre les cours des énergies conventionnelles et ceux des matières premières agricoles, desservies par le risque d'opportunisme des producteurs agricoles; les externalités de développement territoriaux évidentes mais difficiles à rendre audibles politiquement, à cerner économiquement ; enfin les

conflits d'usages autour de la valorisation de la biomasse qui vont crescendo à mesure de l'innovation technologique qui en diversifie les usages et en accroît les rendements.

Introduction

Malgré la fin annoncée des ressources fossiles depuis bientôt 50 ans il est curieux de constater la progression très modeste des systèmes productifs que recouvre le concept de bioéconomie, soit des systèmes productifs distincts de la forme industrielle dominante, linéaire et basée sur l'exploitation non renouvelable de ressources fossiles. Très peu d'histoires longues dans l'économie industrielle sont à disposition du chercheur et qui permettraient d'en saisir par l'analyse l'essence du succès. L'aventure brésilienne autour de l'économie de la canne à sucre constitue l'un de ces exemples, son analyse sur le temps long éclaire sur le potentiel de la bioéconomie mais aussi et surtout sur les conditions de son émergence.

Au Brésil, la canne à sucre fournit environ 17% du mix énergétique national, 45% des véhicules fonctionnent avec du bioéthanol de première génération et 10% de l'électricité consommée dans le pays est issue de la combustion des résidus de canne. Pour mieux comprendre les déterminants du succès de ce modèle, ainsi que ses crises et ses limites, nous analysons depuis sa genèse les différents cycles d'innovation, technologiques et politiques, qui en ont nourri l'essor ainsi que les conditions de son soutien public.

I - Fin XIX^{ème}, La filière éthanol émerge en réponse aux crises des prix du sucre

I.1 - Préhistoire de la filière éthanol brésilienne et de son système technologique

L'économie brésilienne naît avec la culture de canne à sucre et la traite négrière dont elle est le principal débouché. Introduite au Brésil dès l'arrivée des colons portugais en 1530, la canne est la matière première de la production sucrière qui, dès ses débuts, est pour partie exportée, donc exposée au marché international et ses fluctuations. Dès le XIX^{ème} siècle, les prémises de la mondialisation connectent des territoires, l'activité sucrière du Brésil est exposée aux mêmes marchés que ses concurrents betteraviers européens dont elle importe les technologies pour maintenir son niveau de compétitivité. La filière est dès ses débuts exposée à un environnement très compétitif dans lequel la technologie est déterminante pour le maintien du niveau de compétitivité. A ses débuts le Brésil importe les innovations plus qu'il ne les forme, tant technologiques qu'organisationnelles, car la gouvernance des modèles techno-industriels est déterminante pour l'absorption technologique. Une forme de convergence s'instaure donc entre le Brésil et l'Europe.

Entre la fin du XIX^{ème} et le début du XX^{ème} siècle sévit une crise chronique des prix du sucre sur les marchés internationaux qui impacte les revenus d'exportation de la filière sucre brésilienne. S'inspirant de la réaction des producteurs de sucre de betterave occidentaux et en particulier français à cette même crise, les producteurs brésiliens se mobilisent pour développer

sur leur territoire un nouveau marché : celui de l'éthanol combustible/carburant¹. A cette époque il n'y a pas assez d'automobiles en circulation pour que l'éthanol carburant puisse représenter un marché significatif, l'objectif est alors plus de développer l'éthanol combustible, source de chaleur ou de lumière pour les marchés de l'éclairage public². Les brésiliens produisent déjà de l'éthanol à partir de la mélasse résiduelle des cycles de production de sucre, c'est un coproduit, mais les producteurs brésiliens de canne souhaitent en faire un produit à part entière, issu de la transformation directe de canne en lieu et place du sucre, afin de diversifier leur marché et ainsi de réduire leur exposition aux fluctuations des cours mondiaux du sucre.

Ce qu'envisagent les acteurs brésiliens c'est d'importer les technologies européennes pour la structuration d'une industrie de l'éthanol, mais les marchés locaux de l'éthanol ne permettent pas d'en financer les investissements.

L'éthanol brésilien n'est pas concurrentiel par rapport au kérozène importé pour les marchés publics de l'éclairage public et, selon ses défenseurs, l'émergence d'une filière éthanol domestique nécessite une politique industrielle dédiée qui passe par la protection des marchés et le soutien public au développement industriel de la filière. S'organise alors un groupe de pression, la Société Nationale d'Agriculture (SNA)³, elle assure dès 1901 la démonstration publique de l'efficacité de l'éthanol combustible⁴ et de la vertu d'une filière éthanol comme soutien à la filière canne à sucre⁵. En vain.

Dans le Brésil des années 1910, des marchés de niches se développent pour l'éthanol local, mais l'absence de soutien public en limite la généralisation : c'est de l'éthanol de mélasse qui continue d'alimenter ces marchés et l'objectif de diversification des marchés pour la filière canne n'est pas atteint. L'usage de l'éthanol se développe mais la faiblesse du marché ne permet pas d'investir dans la nécessaire transformation technologique de la filière pour faire de l'éthanol un produit – plutôt qu'un co-produit - de la filière canne. La SNA poursuit son plaidoyer en faveur de la mise en place d'un mécanisme de régulation des prix et/ou la subvention du marché de l'éthanol mais le gouvernement demeure peu réceptif et le marché de l'éthanol reste anecdotique jusqu'au milieu des années 1920⁶.

¹ Dès 1955, les producteurs de sucre européens ont œuvré au développement de marchés pour l'éthanol combustible et carburant de betterave. Les innovations technologiques autant que politiques développées en Europe pour ouvrir les marchés de l'éthanol dans l'objectif de valoriser les excédents de production de betterave ont fortement influencé les producteurs de canne à sucre brésiliens qui se sont mobilisés pour les importer (Barros Meira, 2003).

² C'est en 1905 qu'est pour la première fois fait mention au Brésil de l'usage possible de l'éthanol comme carburant, à des fins d'éclairage public, dans une communication de la Seconde Conférence Sucrière basée sur un article allemand transcrit dans la revue « A lavoura » sous le titre « le développement de l'utilisation de l'éthanol ». CARLÍ, (1979),

³ Sociedade Nacional de Agricultura.

⁴ Notamment par l'organisation de congrès et d'expositions technologiques et industrielles dédiées à l'éthanol

⁵ Ses promoteurs le présentent avant tout comme une solution aux problèmes de surproduction de sucre (Barros Meira, 2003; Dunham et al., 2011).

⁶ (Melo, 1942)

Malgré l'absence de cadre réglementaire de soutien à la filière éthanol, se met en place l'écosystème d'acteurs à partir duquel se développera le système d'innovation de la canne qui portera l'émergence et l'essor de la bioéconomie brésilienne.

I.2 - Le Crack de 1929 entraîne l'adoption d'une politique industrielle volontariste, l'éthanol au centre

La donne géopolitique internationale évolue lentement en faveur des biocarburants et le travail d'influence opéré par la SNA auprès du gouvernement finira par payer. Avec le développement de l'automobile, les années 1920 voient s'affirmer l'importance stratégique des carburants mais, déjà, des limites du pétrole fossile⁷, au Brésil comme aux Etats-Unis l'éthanol était perçu comme le carburant de l'avenir⁸. Le gouvernement brésilien s'ouvre doucement aux arguments de la SNA et développe des essais technologiques pour valider⁹ et bientôt promouvoir l'éthanol carburant¹⁰. Anticipant le soutien public, un groupe d'industriels importe en 1927 depuis l'Europe des usines de distillation de jus de canne pour la production d'éthanol¹¹. Mais le soutien public indispensable à une structuration de filière d'échelle nationale ne vient toujours pas, la filière patine et s'essouffle. Ce sont les répercussions du krach de 1929 sur l'économie brésilienne qui achèvent de convaincre le gouvernement brésilien de soutenir l'éthanol domestique. La crise a poussé la filière canne – cœur de l'économie nationale - au bord de la faillite, s'en est suivi un changement de gouvernement et un profond tournant en faveur d'une politique industrielle volontariste, la filière éthanol en est l'une des premières bénéficiaires¹² : en 1931 est adopté un décret¹³ stipulant l'obligation d'ajout d'au moins 5% d'éthanol domestique au carburant essence importée ; dans son application l'incorporation se fera dans une fourchette

⁷ Déjà, à l'époque, la conscience de la limite des réserves de pétrole était forte. En 1921 les projections tournaient autour de 80 ans de réserves en pétrole (A Lavoura, 1923 cité par Barros Meira, 2003).

⁸ A partir de 1925 le développement du parc de véhicules automobile brésilien est tel (73.537 véhicules passagers en 1925 pour 102.907 en 1926.) que l'éthanol-carburant devient de plus en plus perçu par les opinions publiques et privées comme une option industrielle, économique et stratégique pertinente (Barros Meira, 2003)..

⁹ Aux arguments économiques, stratégiques et politiques s'ajoutent les démonstrations techniques réalisées par les corps scientifiques allemand et français de la qualité de l'éthanol, utilisé pur ou en mélange, comme carburant dans les moteurs à essence (CARLÍ, 1979)

¹⁰ En 1921 est créée la Station Expérimentale des combustibles et des Mines (EECM *Estação Experimental de Combustível e dos Mineiros*. organe public adossé au Ministère de l'Agriculture, de l'Industrie et du commerce (MAIC) qui avait pour mission de tester et de diffuser les connaissances relatives à l'utilisation des carburants et combustibles miniers. En 1922, les conclusions du « Premier Congrès sur le Charbon et autres Combustibles Nationaux » organisé par l'EECM concluent au besoin de soutenir le développement de la filière éthanol carburant. L'EECM organise la promotion du carburant éthanol : le moteur d'un véhicule Ford 4 cylindre est adapté pour fonctionner à l'éthanol, ses performances aux grands shows de courses automobiles retiennent l'attention du public (L'EECM ne fait là que répéter une expérience déjà réalisée par la SNA quelques années auparavant (Barros Meira, 2003).

¹¹ (En 1927 l'usine de USGA lance à Recife la commercialisation d'un carburant composé à 55% d'éthanol hydraté et à 45% d'éther, une initiative qui sera suivie par les usines « *Azulina* », « *Motorina* » et « *Cruzeiro do Sul* ». (Melo, 1942). (Dunham et al., 2011)

¹² Getúlio Vargas réalise un putsch en 1930 et entreprend une série de mesures destinées à surmonter les effets de la crise économique, le pays entre dans une ère d'interventionnisme étatique très prononcé (Torres da Veiga Pereira, 2007). La crise de 1929 a sérieusement affecté les exportations brésiennes et l'industrie sucrière est au bord de la faillite, les mesures interventionnistes prises par le gouvernement Vargas en 1931 visent, entre autres, son sauvetage. Suivant en partie les recommandations formulées depuis 1905 par la SNA, les mesures du nouveau gouvernement stipulent la mise en place d'un cadre réglementaire de soutien à l'industrie de la canne dont l'objectif est de développer le marché de l'éthanol afin de valoriser les excédents de production de l'industrie sucrière

¹³ Le décret 19.717/31

de 5 à 40% afin de garantir l'achat de tous les excédents de production de canne en cas de baisse des cours du sucre. A cette époque l'éthanol de canne à sucre est encore un produit marginal, principalement issu de la transformation de la mélasse résiduelle, le décret du gouvernement Vargas cible explicitement la transformation directe de la canne à sucre en éthanol, en lieu et place du sucre, afin d'absorber les excédents de production de la filière tout en rémunérant les producteurs ; il crée ainsi les conditions du développement de la filière éthanol de canne au Brésil.

Si la création d'une filière éthanol permet de diversifier les marchés de la canne à sucre, elle en complexifie la gestion. Aussi le gouvernement instaure-t-il, en parallèle du programme de soutien public à l'éthanol et sur proposition des producteurs, un organe de contrôle de la filière : l'institut du sucre et de l'alcool, l'IAA. L'IAA définit les volumes de production de chaque producteur, les volumes de transformation de chaque usine, les prix de ventes de chaque produit : canne à sucre, sucre, éthanol et décide de qui est autorisé à vendre¹⁴ ainsi que le taux de mélange d'éthanol au carburant conventionnel¹⁵. L'IAA contrôle les exportations de sucre dont les bénéfices financent le coût de fonctionnement.

La bioéconomie brésilienne émerge donc dans un contexte extrêmement planifié.

En 1940 la filière éthanol est composée de 38 distilleries industrielles, toutes importées d'Europe, pour une production annuelle de 53 millions de litres d'éthanol¹⁶. Le soutien public a permis à système technologique national de jouer son rôle d'absorption des innovations, importées d'Europe, mais le Brésil n'a pas encore acquis les compétences d'innovation nécessaires pour le rendre maître de ses trajectoires technologiques et l'orienter selon ses enjeux de développement nationaux.

La deuxième guerre mondiale impacte fortement le commerce international et coupe les flux d'importation technologique du Brésil qui acquies par nécessité les capacités d'innovations qui lui manquaient. L'effondrement des exportations de sucre entraîne un accroissement des volumes de canne transformées en éthanol et les industriels nationaux sont encouragés à assurer par le développement de leurs capacités de production le relai des importations technologiques¹⁷. Le secteur de l'éthanol est déclaré d'intérêt national (décret 4722), ce qui implique de facto le maintien des conditions préférentielles de soutien aux filières canne à sucre, sucre et éthanol¹⁸.

Le Brésil devient autonome dans le pilotage du développement technologique et industriel des filières bioindustrielles, la filière éthanol se développe et, entre 1931 et 1975¹⁹, assure 7,5% de

¹⁴ (de Moraes & Zilberman, 2014)

¹⁵ (laissé libre jusqu'à 40% en mélange afin de garantir l'achat de tous les volumes de production attribués aux producteurs et d'amortir les aléas de production de canne à sucre)

¹⁶ (Melo, 1942)

¹⁷ L'affirmation durant cette période de l'industriel Dedini comme leader national de la fabrication d'usines pour l'industrie de la canne à sucre est emblématique de l'acquisition de compétences d'innovation par le système technologique brésilien. Dedini est aujourd'hui le leader mondial de l'équipement industriel des industries de la canne.

¹⁸ (de Moraes & Zilberman, 2014)

¹⁹ (Lynd et al., 2015)

la demande brésilienne en carburant. Cependant, dans ces proportions l'éthanol ne parvient pas véritablement à jouer son rôle de tampon des fluctuations des cours du sucre, l'essor de la filière reste limité par la faiblesse du soutien public indispensable au déploiement d'un parc industriel complet et l'atteinte d'économies d'échelles nécessaires aux gains de compétitivité. Jusque dans les années 1970, l'engagement public sert surtout une stratégie de soutien à une filière agroindustrielle d'importance nationale, pas encore une stratégie de réduction de la dépendance au pétrole²⁰ et c'est probablement ce qui manque pour passer le cap.

La crise du pétrole de 1973 change la donne et accroît la dimension stratégique de l'éthanol. Entre 1973 et 1975, le coût des importations de pétrole brésilien est plus que doublé²¹, la diversification des sources d'énergies occupe le débat public, elle est rapidement traduite en objectifs de développement. Le gouvernement réagira par la création d'un plan national de développement de l'éthanol carburant : le Proalcool.

II – 1975, Création d'un programme de soutien massif à l'éthanol : le Proalcool

La première séquence de développement de l'éthanol brésilien illustre l'importance de la technologie et de l'encadrement public pour l'émergence d'une filière bioéconomique en compétition avec un système industriel conventionnel et dominant. Le soutien public a permis la naissance d'une filière maïs, en ces proportions, ne suffit pas à faire de l'éthanol un véritable produit alternatif au sucre pour équilibrer les cours de la filière canne.

Les répercussions du krach pétrolier de 1973 sur l'économie brésilienne vont convaincre le gouvernement brésilien d'un soutien beaucoup plus affirmé à l'éthanol de canne à sucre. Les crises de 1973 et 1975 aboutiront en 1975 sur la création du Proalcool, le plus important programme de soutien public à l'éthanol jamais entrepris²². Développé en deux actes sur une durée de 10 ans, 1975 à 1985, le Proalcool cible à son lancement en 1975 la production de 3 milliards de litres d'éthanol à horizon 5 ans (1980), et 10 milliards de litres à horizon 10 ans (1985). En 1975, la production d'éthanol au Brésil était de 625 millions de litres.

Cependant, et aussi contre-intuitif que cela puisse paraître, à sa création ce n'est pas l'argument de sécurité énergétique qui emporte la décision du gouvernement mais bien le motif historique de soutien à l'économie rurale et à la filière canne²³. La phase 2 du Proalcool, actée en 1979 est

²⁰ (Calabi et al., 1983 cité par CGEE, (2007))

²¹ Lors du premier choc pétrolier, le baril passe de 2 à plus de 12 \$, le Brésil importe alors plus de 80% de son pétrole, ses dépenses en importations de produits pétroliers ont connu une croissance de 450% entre 1973 et 1974, malgré une augmentation des volumes d'à peine 15%, ces dépenses sont passées de l'équivalent de 750 millions de \$ en 1973 à 4,1 milliards de dollars en 1974.

²² Le Proalcool est la mesure phare du nouveau gouvernement du régime militaire brésilien, Ernesto Geisel est depuis 1974 le nouveau président de la dictature militaire instaurée en 1964.

²³ L'article n°2 du décret 76.593/75, énonce clairement les objectifs du Proalcool : « Stimuler l'expansion de l'offre de matières premières (de canne à sucre) en accordant une importance particulière à **l'augmentation de la productivité agricole, la modernisation et le développement des usines** de production existantes, et à **l'installation de nouvelles unités productrices d'éthanol**, annexes ou autonomes aux usines de sucre déjà existantes». Le contexte d'adoption du proalcool renforce l'analyse d'un programme créé en premier lieu pour soutenir la filière canne : au moment de l'adoption du programme les prix du pétrole sur les marchés internationaux ont commencé à baisser, des découvertes de pétrole viennent d'être annoncées au Brésil (de Moraes & Zilberman, (2014)).

quant à elle directement motivée par l'argument d'indépendance énergétique. Cette distinction est importante pour rappeler le rôle premier des filières agro-énergétique qui est le soutien à une filière agricole amont, et non le développement d'énergies directement compétitives avec les énergies conventionnelles²⁴.

1^{ère} Phase du Proalcool, 1975-1979, stimulation de l'offre, et création d'un marché garanti.

Dans la première phase du Proalcool le système technologique en place suit le sentier initié, il n'y a pas d'innovation ou de rupture technologique majeure, l'Etat garantit les marchés de l'éthanol et soutient financièrement l'extension des capacités industrielles, l'activité se développe en conséquence. Les mesures alors développées portent principalement sur la stimulation de l'offre et la création d'un marché garanti. La stimulation de l'offre concerne, outre l'extension des capacités de production de canne à sucre, le renforcement des capacités industrielles déjà existantes et la construction d'usines de production d'éthanol annexes aux usines de sucre. L'éthanol produit durant la première phase du Proalcool est principalement de l'éthanol anhydre, utilisé en mélange à l'essence conventionnelle.

La première phase du Proalcool n'a qu'un impact modéré sur la filière dont le nombre d'usines²⁵ s'accroît de 11,5% entre 1975 et 1981²⁶, une croissance qui tiendrait beaucoup plus à la chute des prix du sucre sur les marchés internationaux qu'aux mesures du Proalcool²⁷. Cependant le Proalcool a permis d'atteindre l'objectif initial des producteurs mobilisés pour son développement puisqu'il est déjà efficace pour la régulation des prix de la filière canne²⁸.

Une crise à mi-programme illustre la fragilité des filières de la bioéconomie

En 1979, la poursuite du Proalcool est inquiétée par des fluctuations à la hausse du prix du sucre sur les marchés internationaux, les producteurs de canne se désintéressent de l'éthanol et sont tentés par les marchés clandestins du sucre à l'export. Le comportement opportuniste des producteurs de canne, pourtant engagé de longue date dans une lutte d'influence pour un soutien public de l'éthanol, illustre bien la nécessaire finesse d'encadrement public dans le développement des filières de la bioéconomie, par nature fragiles car exposée au double risque de compétition avec les produits de l'économie conventionnelle auquel elles se substituent et la hausse des cours du produit principal de leur filière agricole d'origine.

La crise géopolitique internationale s'aggrave, le gouvernement enfonce le clou

La même année, l'économie brésilienne est mise en difficulté par une inflation galopante (77% en 1979) à laquelle s'ajoute le deuxième crack pétrolier lié à la guerre entre l'Iran et l'Irak. Les

²⁴ Cette confusion courante en économie du développement est notamment à l'origine du drame des projets de « jatropha énergie » soutenus en Afrique de l'Ouest au milieu des années 2000 par les agences d'aide publique au développement influencées par l'analyse à courte vue des ONG anti biocarburants issus de matière première alimentaire... quand bien même la fonction des agro énergies, extrapolable aux filières bio-industrielles, est notamment de soutenir la sécurité alimentaire par les mécanismes de résilience économique des filières que nous décrivons.

²⁵ Usine de pressage de la canne et unité de transformation en sucre ou de distillation en alcool, ou mixte sucre/alcool.

²⁶ (de Arruda Veiga Filho & Ramos, 2006)

²⁷ selon de Moraes & Zilberman, (2014),

²⁸ (Ramos, 1991)

importations de pétrole représentent toujours 32% des dépenses d'importation du Brésil mais le Proalcool s'essouffle et ne parvient pas à fournir un volume d'éthanol qui permet d'envisager l'indépendance énergétique du pays. Les craintes liées à la guerre entre l'Iran et l'Irak sur l'évolution des cours du pétrole renforcent la motivation du gouvernement à atteindre l'indépendance énergétique. Mais les réticences des producteurs de canne à sucre à alimenter les usines d'éthanol face à la montée des prix du sucre inquiètent quant à la capacité de l'Etat à assurer la pérennité de la production en éthanol. Le gouvernement est de plus en plus déterminé à faire de l'éthanol un outil majeur d'indépendance énergétique. Pour compenser et parer le risque d'une baisse de production d'éthanol le gouvernement affermi son soutien à l'éthanol en établissant via un mécanisme de subventions la parité entre les prix payés aux producteurs de canne selon que leur production soit destinée au sucre ou à l'éthanol.

Pour la première fois l'ambition publique concernant l'éthanol devient en premier ordre l'indépendance énergétique, cet enjeu nécessite d'aller au-delà de la simple incorporation d'éthanol en mélange au carburant conventionnel, l'éthanol doit pouvoir être utilisé en lieu et place de l'essence. A nouveau, la réponse sera d'ordre technologique.

2^{ème} phase du Proalcool, 1979-1985 : stimulation de la demande

Depuis quelques années le gouvernement demande aux constructeurs automobiles présents sur son territoire²⁹ de développer des modèles fonctionnant au carburant 100% éthanol. Techniquement les constructeurs savent le faire, la technologie est en « gestation » depuis 1976, mais leur confiance dans la capacité du gouvernement à assurer la production d'éthanol est faible. Les industriels de l'automobile sont refroidis par la défection des producteurs suite à la hausse des cours du sucre en 1979, ils n'ont pas entièrement confiance en la capacité du gouvernement à stimuler une offre pérenne de carburant éthanol.

Le gouvernement rassure l'industrie automobile par un signal fort : le budget du Proalcool est restructuré à la hausse pour confirmer l'objectif de production annuelle de 10,7 milliards de litres d'éthanol à horizon 1985³⁰... l'industrie automobile peut désormais s'engager dans la production à grande échelle de véhicules à moteurs 100% éthanol. Dans le contexte politique dictatorial de l'époque la demande du gouvernement aux constructeurs automobiles a valeur d'ordre³¹ ; cependant la forte hausse des prix des carburants conventionnels fait peser un risque sur l'avenir de l'automobile à moteur essence conventionnelle et il est également dans l'intérêt de l'industrie automobile de faire la transition vers le moteur éthanol³².

²⁹ Le Brésil n'a jamais disposé d'industrie automobile nationale par contre de nombreux producteurs automobiles produisent des véhicules au Brésil pour le marché brésilien. Au moment du Proalcool les principaux constructeurs automobiles présents au Brésil sont les groupes Volkswagen, General Motors, Volvo, Mercedes-Benz, Ford et Fiat (Santos, 1993).

³⁰ Les constructeurs automobiles réclament au gouvernement un engagement plus fort, le budget fédéral est renouvelé tous les ans et ils craignent que le Proalcool ne puisse plus être financé. En 1979 João Figueiredo remplace Ernesto Geisel à la tête du régime dictatorial et il renouvelle l'engagement du gouvernement en faveur de l'éthanol.

³¹ (Michellon, Santos, & Juliano, (2008)

³² Santos, (1993) ; Scandiffio, (2005), (Torres da Veiga Pereira, 2007).

Le moteur 100% éthanol requiert un éthanol sensiblement différent de l'éthanol déshydraté qui est incorporé à l'essence conventionnelle : l'éthanol hydraté. La priorité du gouvernement devient donc d'adapter le parc techno-industriel de la canne à l'éthanol hydraté :

- A l'amont de la filière pour la production d'éthanol hydraté
- A l'aval pour le transport, la logistique et la commercialisation d'éthanol hydraté.
- A la consommation via la diffusion de moteurs 100% éthanol-compatible

Les industriels automobiles assurent la production et la vente de véhicules à moteur 100% éthanol que les consommateurs achètent rapidement car le carburant éthanol est subventionné, moins cher que l'essence conventionnelle. Les infrastructures de productions, mais aussi de logistique, stockage, transport et distribution d'éthanol font l'objet d'un plan de soutien public³³, l'Etat finance la mise aux normes et l'extension des infrastructures de stockage et de distribution d'éthanol (réservoirs, pipelines, voies ferrées et terminaux portuaires). La compagnie nationale de production et de distribution de carburant, Petrobras, est en charge de l'exploitation et du développement de ce nouveau réseau. Parallèlement les mesures existantes pour le soutien au développement de la filière éthanol sont renforcées, elles ciblent principalement l'augmentation du nombre de distilleries indépendantes³⁴.

Cette transition permet au gouvernement de revoir ses ambitions de production d'éthanol à la hausse et l'objectif, annoncé en 1975 pour 1985, d'une production annuelle de 10,7 milliards de litres d'éthanol, est en 1979 porté à 14 milliards de litres pour 1987. Le pilotage et la coordination de ce nouveau volet du Proalcool fait l'objet d'ajustements administratifs³⁵ et son financement est assuré par Petrobras via un fonds alimenté par les taxes prélevées par le groupe pétrolier national sur les ventes de carburant diesel³⁶.

Les ambitions initiales du Proalcool seront dépassées.

Résultats du Proalcool : essor sans précédent des filières amont et aval de la canne à sucre

³³ Plus corrosif que l'essence, l'éthanol hydraté nécessite que les matériaux constitutifs des infrastructures logistiques soient spécifiquement traités contre la corrosion.

³⁴ L'accent mis sur les distilleries indépendantes plutôt que sur les distilleries annexes aboutit sur l'affirmation d'une filière éthanol autonome.

³⁵ Afin d'organiser le fonctionnement de la deuxième phase du Proalcool et d'optimiser son application, le gouvernement crée deux nouveaux organismes en charge du pilotage du secteur : le CNAL (Conseil National de l'Alcool) et son organe exécutif, le CENAL (Commission Exécutive Nationale de l'Alcool), sous la direction du Ministère de l'Industrie et du Commerce (MIC) et formé de membres de plusieurs ministères et de confédérations de l'industrie, du commerce et de l'agriculture. Le CNAL est en charge de la formulation et de la supervision de l'application des politiques relatives au Proalcool ainsi qu'au renforcement de l'assiette budgétaire d'appui au programme. La cohabitation au sein d'une même instance publique de représentants de sphères politiques, industrielles et agroindustrielles contribue à assurer que le SIT de la canne serve des enjeux de développement locaux.

³⁶ En charge de la distribution de l'éthanol, Petrobras crée sur ordre du gouvernement un fonds d'équilibre des prix entre l'éthanol et le carburant conventionnel, le « compte éthanol » qui est alimenté par une taxe sur le carburant diesel et destiné à compenser un surcoût de production de l'éthanol que ne parviendrait pas à empêcher le fonds déjà opérationnel de l'IAA et financé lui par les recettes d'exportation de sucre.

« Le Proalcool constitue la plus importante innovation politique destinée à accroître la production sucrière de l'histoire du pays (...) il a permis une augmentation des rendements du secteur sucrier sans précédent »³⁷. Entre 1975 et 1980 la surface de canne cultivée a connu une expansion de 609.000 ha (+29%) et la surface moyenne de l'exploitation de canne a augmenté de 36,4%, traduisant une concentration du secteur, concomitante de son expansion. Dans le même temps les rendements de production agricole³⁸ ont augmenté de plus de 20% alors que le rendement industriel³⁹ a augmenté de 35,6%⁴⁰.

Le Proalcool a également entraîné une insertion massive et rapide de l'éthanol dans le mix carburant du pays. Entre 1975 et 1986 la part de l'éthanol dans le mix carburant est passée de 7% à 55,5%, sa production atteint 11 milliards de litres en 1985, chiffre supérieur aux ambitions du gouvernement lors du lancement du programme⁴¹. En 1975 l'éthanol est principalement issu de la transformation de mélasse résiduelle, c'est un coproduit de la filière sucre, en 1985 il est intégralement produit à partir de la transformation directe de la canne à sucre, c'est un produit industriel à part entière qui absorbe 60% de la production de canne du Brésil⁴² et qui a stimulé le développement de la filière canne en conséquence.

Le parc automobile national a également été profondément modifié. Les parts de marchés des véhicules à carburant 100% éthanol sont passées de 0,4% en 1979 à 66% en 1986. En 1985 la flotte brésilienne comptait près de 2,5 millions de véhicules 100% éthanol.

Le Proalcool a également eu un impact important sur le développement rural avec la création de 625.000 emplois directs et de 828.000 emplois indirects en milieu rural⁴³. Il a aussi entraîné le développement de la filière canne qui a financé la recherche génétique en agronomie pour l'amélioration des rendements de la canne à sucre, donc également la formation du capital humain du pays : techniciens, ingénieurs et chercheurs. En ce sens il a été un moteur de développement national.

Un coût public conséquent

Les compétitions entre énergies sont avant tout des compétitions entre les systèmes technologiques qui en permettent la production et la consommation, afin d'assurer le développement du système technologique des énergies de la canne à sucre le gouvernement a dû assumer le coût financier de sa protection, le temps de son incubation.

Les incitations fiscales du gouvernement, avec les prix bas garantis pour le carburant éthanol, ont été les principaux leviers de substitution de véhicules fonctionnant au carburant alternatif à la flotte de véhicule conventionnels. Les prêts proposés par le gouvernement dans le cadre du

³⁷ (Santiago, Ivo, Barbosa, & Rosseto, 2006)

³⁸ Tonnes de canne à sucre récoltée par hectare planté.

³⁹ Tonnes de sucre produit par hectare planté.

⁴⁰ (de Arruda Veiga Filho & Ramos, 2006; Pereira de Carvalho & De Oliveira Carrijo, 2007)

⁴¹ (Pereira de Carvalho & De Oliveira Carrijo, 2007).

⁴² (de Moraes & Zilberman, 2014)

⁴³ Magalhães, (1991), (Pereira de Carvalho & De Oliveira Carrijo, 2007).

Proalcool pour financer le développement industriel du secteur l'ont été à taux d'intérêts négatifs compte tenu de l'inflation de l'époque⁴⁴. **Les estimations du coût du Proalcool divergent dans une fourchette comprise entre 6 et 15 milliards de \$ de 1990.** Ces financements n'ont pas seulement servi à financer le parc techno-industriel de l'éthanol, en finançant la création de capital humain, ils ont permis au Brésil de se doter d'un système d'innovation national capable d'inventer ses propres trajectoires de développement, via l'innovation technologique et politique.

Cela n'immunise pour autant pas le pays des crises, et le changement qui advient au milieu des années 1980 sera cuisant pour l'éthanol brésilien.

III - Après le Proalcool une décennie de crise pour les filières éthanol

L'année 1985 est marquée par la baisse des cours du pétrole, par la hausse des prix du sucre sur les marchés internationaux et par un changement de régime politique au Brésil, un contexte critique et qui expose les filières de la bioéconomie à leur fragilité structurelle.

La combinaison d'un contexte économique défavorable aux agroénergies et d'une crise de l'économie brésilienne pousse le nouveau gouvernement⁴⁵ à réduire son soutien aux filières agroénergies. Cette période libérale est l'occasion d'une restructuration compétitive des filières de la canne à sucre, elle bénéficiera aux filières du sucre portées par la hausse des cours mais en coutera aux filières agroénergies.

La filière canne à sucre s'est fortement développée durant les années 1990 grâce à l'essor du marché de l'export⁴⁶ qui a permis de financer sa restructuration et l'acquisition de gains de compétitivité.

Pour les filières éthanol, la restructuration a été beaucoup plus douloureuse. Plus de 130 usines de production d'éthanol font faillite entre 1986 et 1997, sur un total initial de 467⁴⁷. Les obligations publiques d'incorporation d'éthanol au mix carburant conventionnel sont toutefois maintenues durant la décennie 1990, c'est notamment ce qui permet aux filières agroénergies de survivre.

IV - 2003, le virage du Flex-fuel et le développement de la filière bioélectricité

Le début de la décennie 2000 est marqué par une augmentation régulière et soutenue des prix du pétrole, les pronostics d'évolution des cours sont à la hausse. La filière sucre est mature, et ses coûts de production sont parmi les moins élevés au monde, la canne est devenue une matière

⁴⁴ (Furtado et al., 2011)

⁴⁵ Le régime dictatorial militaire est remplacé par un régime démocratique présidé par Tancredo Neves.

⁴⁶ Entre 1992 et 1999, le Brésil a multiplié ses exportations de sucre par 5, devenant le premier exportateur mondial, en 2004 le pays représentait 36,2 % des exportations mondiales de sucre.

⁴⁷ Nombre d'usines 100% éthanol ou mixte sucre-éthanol, de Arruda Veiga Filho & Ramos, 2006

première qui permet d'envisager la production d'éthanol à des coûts compétitifs avec les carburants conventionnels⁴⁸. En 2000 le gouvernement commence à percevoir que l'avantage compétitif qu'est devenu la filière sucre peut désormais être étendu au secteur du carburant et de la biomasse-électricité. Dès 2000, une série de décisions marque l'intérêt renaissant du gouvernement brésilien pour l'éthanol, on y perçoit l'ambition naissante de remplacer le système techno-industriel conventionnel du pétrole par celui de la canne, un premier pas vers une vision bioéconomique nationale⁴⁹.

Dans ce contexte règlementaire favorable au carburant éthanol émerge le levier principal du redémarrage de la filière éthanol, là encore, technologique : le moteur Flex-fuel, qui accepte indifféremment de l'éthanol et du carburant conventionnel⁵⁰. Cette innovation est clé car elle permet de surmonter la crise de confiance des consommateurs qui a suivi la sortie du Procalcool : les faillites d'usines d'éthanol ont entraîné des pénuries de carburant éthanol à la pompe et les automobilistes qui avaient acheté des véhicules à moteur éthanol – sur incitation gouvernementale – ont eu le sentiment d'être floués, incapable d'utiliser leur voiture par manque de carburant adapté. Le frein principal à la relance de la filière éthanol au début des années 2000 est ainsi celui de la confiance du consommateur, le moteur Flex-fuel permet de le lever ; mieux, il permet à l'automobiliste de consommer toujours à son avantage entre carburant conventionnel et éthanol.

A nouveau, le gouvernement crée les conditions institutionnelles et règlementaires permettant d'accélérer la substitution de carburant éthanol à celle de carburant conventionnel. Pour cela il stimule :

⁴⁸ (Cassuto, 2013)

⁴⁹ Le décret 3.546 (2000) charge le CIMA de créer les politiques permettant « d'adapter les produits énergétiques de la canne à sucre à la matrice énergétique du pays, d'assurer le fonctionnement de mécanismes économiques permettant l'autonomie du secteur et d'appuyer le développement scientifique et technologique du secteur ». Ce décret traduit l'expression claire d'une volonté publique de renforcer la substitution d'un système technologique alternatif basé sur l'exploitation d'une matière première renouvelable et locale au système technologique pétrole. En 2001 la loi 10.336/01 instaure une nouvelle taxe applicable aux carburants : la CIDE, mais décision est prise d'en exempter la filière éthanol. L'application de la taxe CIDE à la filière éthanol aurait du se traduire par un prélèvement additionnel aux taxes déjà en vigueur d'une valeur de 23 R\$ par mètre cube d'éthanol commercialisé (Farias, 2011). En 2003, un autre jeu de mesures renforce le soutien public indirect à la filière éthanol : le gouvernement déclare les activités relatives à la vente d'éthanol anhydre⁴⁹ exemptes des contributions sociales PIS, PASEP et COFINS (PIS, Programme d'Insertion Sociale ; PASEP ; Programme de Formation du Patrimoine du Service Publique ; COFINS, Contribution au Financement de la Sécurité Sociale.)

⁵⁰ Le moteur « Flex-fuel » a été développé au début des années 1990 par le groupe Bosch. En 1994 un véhicule équipé du moteur « Flex-fuel » de Bosch avait été proposé par Général Motors aux constructeurs automobiles présents sur le marché brésilien, à l'époque ils n'étaient pas intéressés car le prix de l'éthanol n'était plus compétitif par rapport au pétrole, le secteur de l'éthanol était en pleine crise et le gouvernement ne montrait aucun signe de soutien à l'éthanol. Plus tard, en 1998, le groupe Fiat a créé son propre prototype de véhicule « Flex-fuel » mais pour les mêmes raisons que GM, l'accueil réservé au produit a été défavorable au Brésil. Avec le changement de conjoncture du début des années 2000, la hausse des cours du pétrole et la perspective d'un éthanol à prix très compétitif grâce à la compétitivité acquise par l'industrie sucrière lors de la décennie précédente, le groupe Volkswagen a développé son propre modèle, le « VW GOL », et s'est préparé à le distribuer au Brésil (VW était alors le dernier constructeur automobile à commercialiser des véhicules 100% éthanol sur le marché brésilien.). En 2002, lorsque le gouvernement brésilien a annoncé l'exemption de taxe IPI pour les véhicules « Flex-fuels » - alors encore non distribués au Brésil - VW a lancé la production à grande échelle et la distribution commerciale. La fabrication, suivie de la distribution des premiers modèles commerciaux a été réalisée en 2003, séduisant très rapidement les consommateurs (Torres da Veiga Pereira, (2007)). En 2006 tous les constructeurs automobiles présents au Brésil proposaient au moins un modèle bicom bustible (flex-fuel). Il existe aujourd'hui au Brésil plus de 60 modèles de véhicules *flex-fuel* différents disponibles sur le marché, fabriqués par dix industriels automobiles d'origine nord-américaine (USA), Européennes, Japonaises.

- L'offre, par des mesures stimulant la production de canne à sucre et sa transformation en éthanol^{51, 52, 53, 54}
- La demande, en incitant à la diffusion rapide de véhicules à moteur « flex » au sein du parc automobile existant⁵⁵.

Résultat : un retour en puissance « accéléré » de la filière éthanol

La diffusion du moteur flex-fuel dans le parc automobile est rapide, efficace, massive ; les aides publiques ont été bien calibrées et les industriels ont suivi, la demande d'éthanol s'envole (cf. fig. 1). Côté offre, le jeu d'aides fiscales déjà accordées à la filière éthanol et la confiance dans l'ouverture du marché assurent un décollage rapide de la production d'éthanol.

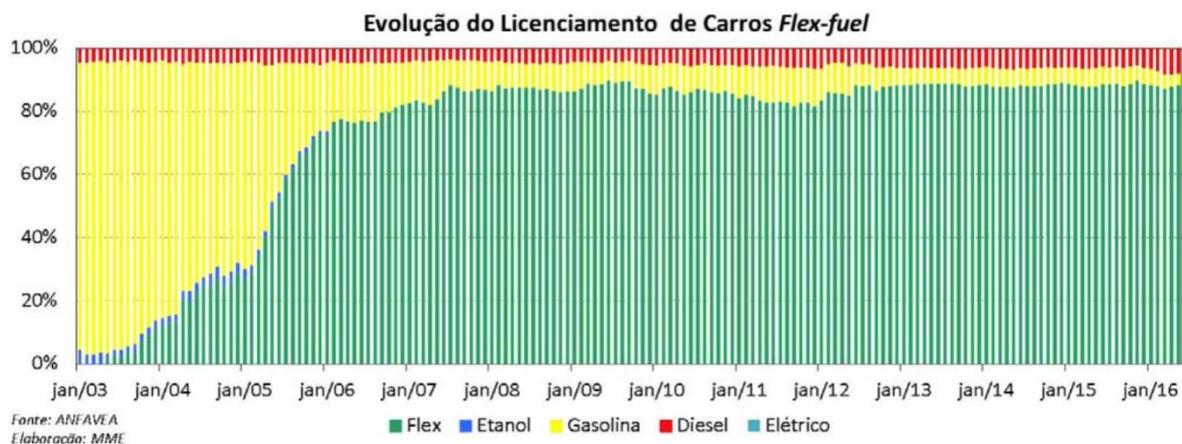


Figure 1: Evolution de la structure des ventes de véhicules au Brésil, par type de moteur, entre 2003 et 2016⁵⁶

⁵¹ 1) Augmentation du volume de crédit public accordé au secteur (via la BNDES), + 770% entre 2003 et 2010, de 722 millions de R\$ en 2003 à 6,3 milliards de R\$ en 2010. Entre 2003 et 2010, un total de 27,2 milliards de R\$ publics ont été prêtés à taux préférentiel au secteur sucre-alcool. 2) 2006 : création de Embrapa bioénergie, nouvelle filiale d'Embrapa (coût porté par Embrapa (public) : 80 millions de R\$ entre 2006 et 2010). 80 millions de R\$ affectés à la recherche sur le secteur éthanol entre 2006 et 2010. 3) Entre 2002 et 2010 le gouvernement a mobilisé un total de 3,9 milliard de R\$ pour développer des infrastructures de stockage et de transport d'éthanol.

⁵² Fiscalité de l'éthanol : La fiscalité de l'Etat fédéral favorise l'éthanol, qui est moins taxé que l'essence conventionnelle, bien que l'écart entre les deux se réduise (La taxation globale appliquée à l'essence est aujourd'hui de 35 %, comparée à 47 % il y a dix ans, tandis que la taxation appliquée à l'éthanol est de 31 % et qu'elle n'a pratiquement pas changé depuis dix ans) (Ministério de Minas e Energia, 2014).

⁵³ Dans tous les Etats brésiliens, la taxe carburant ICMS est plus élevée sur le carburant conventionnel que sur l'éthanol (Ministério de Minas e Energia, 2014)

⁵⁴ Selon les Etats le soutien à l'industrie de l'éthanol est variable. Le Minas Gerais a fait passer sa taxe ICMS éthanol de 22 à 19% en janvier 2012, elle est à 27% pour l'essence ; Dans l'Etat de Sao Paulo, le plus gros producteur de cannes du pays, l'ICMS est à 12% pour l'éthanol, elle est à 25% pour l'essence ; Au Paraná, l'ICMS est de 18% pour l'éthanol et de 26% pour l'essence ; Dans l'Etat de Goiás, l'ICMS est de 22% pour l'éthanol et de 29% pour l'essence.

⁵⁵ 1) Réduction de la taxe IPI, *Imposto Sobre os Produtos Industrializados*, Impôt sur les produits industrialisés. Le décret n°4.902 stipule un passage de l'IPI de 13% à 11% ou 7% selon le type de véhicule concerné (Ministère de l'Agriculture du Brésil). 2) Obligation d'incorporation d'éthanol anhydre à l'essence conventionnelle, entre 18% et 25%, déterminé par l'Etat Fédéral en 2003.

⁵⁶ Parts de nouveaux véhicules déclarées à l'immatriculation. Source Ministério de Minas e Energia, 2016; données : Anfavea.

Entre 2005 et 2009 103 nouvelles usines d'éthanol sont installées dans le pays⁵⁷. La production d'éthanol est passée de 10 milliards de litres en 2000/2001 à 27 milliards en 2009/2010, les exportations d'éthanol de 516 millions de litres en 2001/02 à 4,7 milliards de litres en 2008/09⁵⁸, année où elles ont atteint leur maximum, le Brésil fournissait alors plus de 90% de l'éthanol combustible commercialisé mondialement.

Cette résurrection de la filière éthanol brésilienne a notamment été permis par le maintien des infrastructures de distribution de l'éthanol installées lors du Proalcool, en particulier les pompes à éthanol, restées en service à hauteur de 90% durant la crise de l'éthanol de la décennie 1990. Mais le facteur clé de l'essor spectaculaire de la filière dans les années 2000 est le moteur flex-fuel, garant de la relance de la demande en éthanol et dont la cinétique de diffusion au sein du parc motorisé brésilien témoigne de l'efficacité des politiques publiques d'incitation à son déploiement.

Selon la BNDES, l'éthanol est devenu compétitif avec les carburants pétroliers en 2005. En 2007, le Brésil produisait de l'éthanol pour un coût situé entre 30 et 35 US\$ par équivalent baril de pétrole, le prix du baril de pétrole sur les marchés internationaux était alors supérieur à 60 US\$⁵⁹. Le contexte économique international a porté cette nouvelle phase de la croissance des bioindustries de la canne qui n'ont pas nécessité le même soutien public que le Proalcool, d'autant plus que les infrastructures du système étaient déjà construites, néanmoins l'Etat conserve un rôle déterminant dans son pilotage. Le graphique suivant, qui illustre l'évolution de la production de sucre, et d'éthanol entre 1975 (date du début du Proalcool) et 2012, montre à quel point la croissance de la filière éthanol, initialement instaurée comme outil de soutien à la filière canne à sucre, est dépendante de l'encadrement public. Les deux phases de soutien public aux filières agroénergies, à savoir 1975-1985 (Proalcool) et 2000-2009 correspondent à une croissance forte de la filière éthanol.

⁵⁷ la grande majorité d'entre elles sont des usines d'éthanol autonomes, non liées à des sucreries et produisant uniquement de l'éthanol (International Sugar Organization, 2012)

⁵⁸ (ipea, 2010)

⁵⁹ (Nass, Pereira, & Ellis, 2007) ; Pour Nass et al., (2007), la filière bioéthanol était largement rentable, sans subventions de l'Etat en 2007.

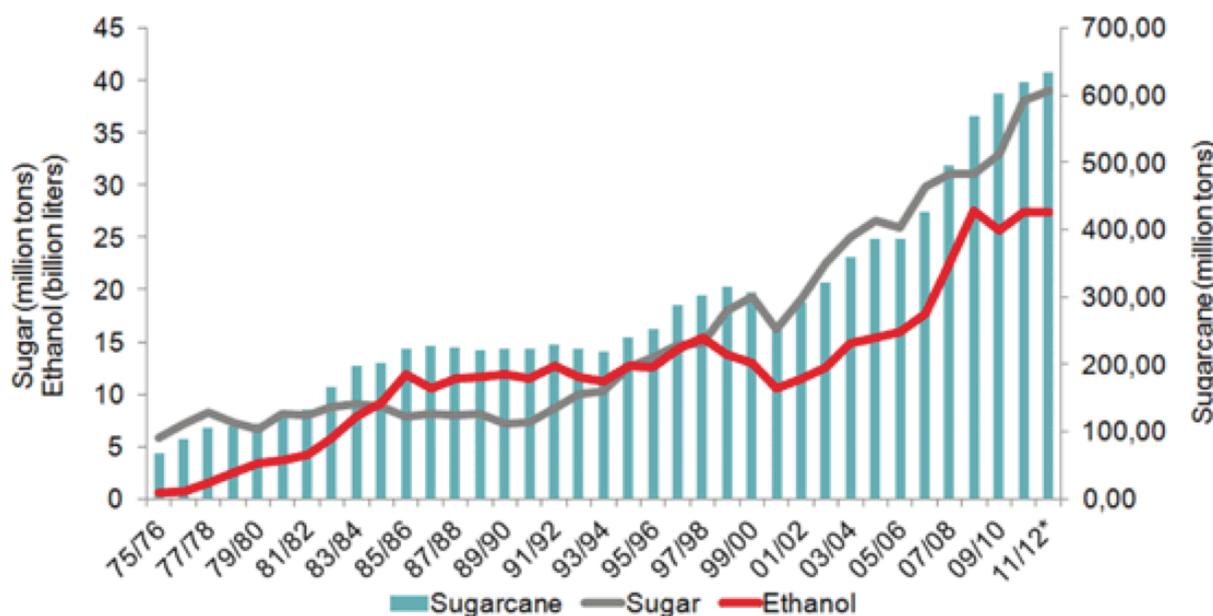


Figure 2: évolution historique des volumes de production des filières canne à sucre, sucre et éthanol (hydraté et anhydre) entre 1975 et 2012⁶⁰.

Ce graphique montre également que la filière agro-industrielle canne à sucre s’est considérablement développée durant ces périodes de soutien public aux agroénergies. Cela confirme la vision initiale des producteurs de sucre brésiliens qui, dès les années 1900, percevaient en la filière éthanol un outil au service de la croissance et de la résilience économique de la filière canne à sucre.

Le soutien public au secteur de la canne au début des années 2000 concerne également le développement d’un nouveau marché, celui de la biomasse-électricité. C’est là aussi par le développement technologique qu’est assuré son essor.

Développement de la filière bioélectricité

L’électricité issue de la cogénération de bagasse de canne à sucre⁶¹ est commercialisée dans le réseau brésilien depuis 1987, à l’époque de manière très marginale car les incitations publiques ne datent que de 1990. Les usines de canne à sucre ont mis du temps avant de parvenir à valoriser correctement le potentiel énergétique de la bagasse, aujourd’hui transformée en vapeur et en électricité grâce aux technologies de la cogénération adaptées d’importations datant du milieu des années 1990.

Historiquement les usines avaient recours à une centrale externe de production de vapeur, alimentée par charbon de bois⁶². Le modèle des usines de la canne à sucre est progressivement passé de la dépendance énergétique externe à l’autosuffisance puis à la production d’excédents commercialisés sur le réseau. La cogénération constitue le dernier développement

⁶⁰ Source : de Moraes & Zilberman, 2014.

⁶¹ Résidu issu du broyage de la canne à sucre.

⁶² Le bois de chauffe représentait, en 1940, 80% de la matière première énergétique du mix énergétique brésilien, il ne représente plus que 8,4% aujourd’hui (Z. J. De Souza, 2000).

technologique effectué pour diversifier les débouchés de la filière canne à sucre et en maximiser les sources de revenus. Comme pour les autres filières de la bioéconomie brésilienne, il a nécessité l'adaptation du cadre institutionnel afin de stimuler les différents sauts technologiques puis leur incubation.

En 1990, l'Etat créé un statut de « producteur indépendant » qui donne un statut légal aux usines souhaitant revendre leurs excédents de production électrique au réseau. Mais ce n'est que dans les années 2000 qu'une série de réformes de libéralisation du secteur de l'électricité d'une part, de soutien au développement de la production de bioélectricité d'autre part, permet l'émergence d'un réel marché pour l'électricité de la canne à sucre et stimule la diffusion des technologies adaptées. En 2001 le gouvernement pousse les opérateurs du réseau électrique, clients des producteurs d'électricité, à mettre en place un système de contrats d'achat de long terme (15 ans) pour l'électricité issue de la biomasse⁶³. Le gouvernement brésilien, par l'intermédiaire de la BNDES, crée également en 2001 le « Programme d'Appui à la Cogénération d'Energie Electrique à partir de Résidus de Canne à Sucre », un ensemble de lignes de crédit à taux et conditions préférentielles pour les industriels investissant dans des centrales de cogénération électrique à haut rendement. Une série d'appels d'offres publics sont également réservés aux énergies renouvelables. Enfin, des opérations d'adaptation du réseau ont été réalisées pour qu'il puisse recevoir l'électricité des usines de canne à sucre.

En 2007, la politique de développement de la bioélectricité met l'accent sur le renouvellement des centrales à cogénération existantes et sur leur remplacement par des centrales à cogénération à haute et très haute performance. La BNDES a pour cela étendu le programme de prêts avantageux proposés aux industriels. Cela s'est traduit par une rupture dans le niveau de performances des équipements installés : depuis 2007, 90% des installations énergétiques sont des systèmes à haute performance.

L'électricité issue de la cogénération de bagasse de canne à sucre devient un 3^{ème} produit du secteur de la canne à sucre, après le sucre et l'éthanol, et intègre aujourd'hui à 100% le modèle de rentabilité de l'industrie de la canne à sucre. En 2007 l'électricité représentait en moyenne 1 à 2 % des revenus totaux des usines de canne, En 2015 ce chiffre était de 16% selon les estimations de la BNDES.

Les améliorations technologiques des centrales de cogénération devraient permettre de faire passer l'excédent d'électricité des usines de transformation de canne à 150 kWh voire 250 kWh par tonne de canne traitée contre 80 kWh en moyenne actuellement. Cette dernière version de la cogénération permettrait une production d'électricité de canne à sucre tout au long de l'année, pas seulement durant la période de récolte.

Mais un autre levier, plus « systémique » transforme également le modèle : la mécanisation de la culture de canne génère un nouveau produit : la paille de canne à sucre (cf. partie 5). Les développements technologiques en cours visent à adapter les chambres de combustion des

⁶³ Ces contrats de long terme ont été nécessaires pour rassurer les investisseurs et stimuler le financement des centrales de cogénération associées aux usines de canne à sucre (Seabra & Macedo, 2011)

centrales de cogénération afin qu'elles puissent valoriser ce nouveau produit⁶⁴. Une compétition d'usage de ce nouveau gisement de biomasse s'installe entre sa valorisation énergétique et sa restitution au sol. Les arbitrages dépendront des évaluations agronomiques des besoins du sol en matière organiques et varieront selon les régimes pédoclimatiques.

V - 2007, Le Brésil en leader rêvé d'un OPEP vert ou les raisons du virage agroécologique

Depuis les années 2000 les pays occidentaux montrent un intérêt croissant pour les carburants renouvelables et différents signaux politiques annoncent entre 2000 et 2006 l'émergence d'un marché d'envergure pour ces « nouvelles énergies », notamment depuis l'Europe et les Etats-Unis⁶⁵.

En 2007, le Brésil produisait de l'éthanol pour un coût situé entre 30 et 35 \$ par équivalent baril de pétrole, le baril était alors à 60\$, dans un climat économique où la majorité des pronostics sur l'évolution des cours internationaux du pétrole annonçait une forte hausse. L'éthanol représentait alors plus de 50% de la consommation de carburant des véhicules (hors fret) sur tout le territoire brésilien. L'industrie de la canne était clairement perçue par le gouvernement – et ce depuis les des années 2000 - comme l'un des secteurs sur lesquels asseoir l'émergence économique nationale, en lui donnant notamment une portée internationale. Cependant les exigences de ces marchés d'exportation sont élevées, et si l'éthanol brésilien possède le meilleur indice CO₂ au monde⁶⁶, son impact social et environnemental hors CO₂ est décrié par une mobilisation croissante de la société civile brésilienne, il reste son principal talon d'Achille. Ce risque sur la croissance de ce qui n'est encore qu'une promesse de marché motive le gouvernement brésilien à lancer, en 2007, une étude sur la stratégie à mettre en œuvre afin de produire du biocarburant i) en quantité suffisante pour répondre à la demande mondiale – espérée – de biocarburants ii) de qualité correspondant aux critères des marchés européens et Nord-américain⁶⁷.

⁶⁴ Programme de recherche du laboratoire CTBE (Centre des sciences et technologies du bioéthanol, de Campinas, Sao-Paulo, financé publiquement et dédié à l'amélioration des technologies de la canne à sucre et à la transition écologique de la filière.

⁶⁵ En 2006 les Etats Unis d'Amérique interdisent l'utilisation de MTBE, un additif utilisé pour accroître l'indice d'octane des carburants et que remplace l'éthanol, les brésiliens y voient une opportunité d'exportation sur le marché américain (de Moraes & Zilberman, 2014). L'année suivante, l'« Energy Independence and Security Act » stipule de porter à 136 milliards de litres la consommation américaine d'éthanol pour 2022 (Kaup, Nitsch, & Menezes, 2011). 14% au moins de cet éthanol devant provenir de « advanced biofuels » à savoir des biocarburants permettant de diminuer d'au moins 50% les émissions de CO₂ en comparaison de celles de l'essence conventionnelle, catégorie que l'éthanol brésilien intégrait déjà aisément. Avec un ratio input/output énergétique de 1/9,3 en 2010, la production d'éthanol de canne à sucre brésilien permet de produire le biocarburant le plus compétitif énergétiquement, donc celui dont le bilan global d'émissions de CO₂ est le plus faible par unité de contenu énergétique (Goldemberg, 2008; Nogueira, Seabra, Best, Leal, & Poppe, 2008). En 2009, l'Union européenne a passé une directive imposant des critères de durabilité aux biocarburants importés, elle renforce la directive de 2003 qui imposait aux Etats membres de fixer des objectifs nationaux d'incorporation permettant d'atteindre l'objectif final de 5,75% d'incorporation en 2010. Au Brésil la directive européenne de 2003 est perçue comme le début d'un engouement important et durable des pays occidentaux pour l'éthanol carburant, ils y voient le marché capable d'assurer une croissance forte de leur filière pour les années à venir (S. Torquato et al., 2008), un tremplin pour le marché international de l'éthanol carburant.

⁶⁶ Avec un ratio input/output énergétique de 1/9,3 en 2010, la production d'éthanol de canne à sucre brésilien permet de produire le biocarburant le plus compétitif énergétiquement, donc celui dont le bilan global d'émissions de CO₂ est le plus faible par unité de contenu énergétique (Goldemberg, 2008; Nogueira, Seabra, Best, Leal, & Poppe, 2008).

⁶⁷ étude, réalisée par le CGEE en 2007

Ce rapport décisif propose en 2007 une stratégie de croissance « écologique » pour permettre au Brésil de **fournir 10% de la consommation mondiale d'essence à horizon 2025**⁶⁸. Il est fondé sur le constat que, bien qu'elle assurait déjà plus de 50% de la fourniture en carburant du pays et plus de 90% des exportations mondiales d'éthanol carburant, la filière éthanol brésilienne couvrait moins de 20% des terres agricoles identifiées comme aptes à sa culture⁶⁹. Prenant en compte le niveau de productivité agricole de l'année 2005, la fourniture de 10% de la consommation mondiale d'essence en 2025 revenait à cultiver 35 millions d'hectares dédiés à la production d'éthanol (5,5 millions d'ha de canne à sucre étaient alors cultivés). Prévoyant large, l'étude préconisait que le Brésil identifie 80 millions d'hectares pour le développement de la culture de canne à sucre. La condition principale pour atteindre cet objectif, selon le rapport, était une révolution du modèle de culture de la canne.

Une transition du modèle cultural est ainsi actée en 2007, elle repose sur deux leviers :

- 1 – La mécanisation de la récolte de cannes – car elle permet d'arrêter la pratique de mise à feu des champs de canne très polluante et destructrice des sols, mais indispensable pour la récolte manuelle
- 2 – La culture sous couvert végétal, plus généralement le développement d'un modèle de culture agroécologique intensif basé sur l'abandon du labour.

L'autre grand objectif du rapport du CGEE de 2007 est la transition vers les technologies dites de deuxième génération, principalement la production d'éthanol à partir de matière végétale de canne à sucre et non plus de sucre, selon un objectif de compétitivité économique et industrielle.

Afin de se donner les moyens de ses ambitions, le gouvernement brésilien investit dans la recherche, l'expérimentation et la diffusion des innovations nécessaires à la transition écologique de la culture de cannes : le CTBE, laboratoire national des Sciences et Technologies du Bioéthanol est créé à cet effet en 2009. Sa mission est de développer les dernières innovations technologiques nécessaires à la production durable d'éthanol, elles couvrent en particulier l'amont agricole en ciblant la production agroécologique de canne à sucre, mais également celles de l'aval de la chaîne de valeur avec les technologiques dites de 2^{ndes} génération pour la production d'éthanol issue d'hydrolyse enzymatique de cellulose. Près de 100 millions de R\$, soit environ 30 millions d'euros, ont été investis par le gouvernement brésilien dans la création du CTBE.

Notons ici l'importance que représente l'exposition aux marchés internationaux pour les transitions « durables » de pays exportateurs : la stratégie de transition vers la durabilité environnementale de la production d'éthanol du Brésil a été établie dans un objectif de certification environnementale du produit éthanol afin de ne pas compromettre les exportations vers les grands pays importateurs, à des fins surtout commerciales donc.

⁶⁸ L'étude du CGEE a été calibrée pour que le Brésil soit en mesure de substituer 10% de la demande mondiale d'essence en 2025⁶⁸, c'était alors l'objectif officiel du pays. En se basant sur les projections du National Energy Information Center de l'administration des Etats-Unis, le CGEE a établi qu'à l'horizon 2025 la production annuelle d'éthanol par le Brésil devait atteindre 205 milliards de litres, cela en vue de substituer la consommation des 170 milliards de litres d'essence représentant 10% de la consommation mondiale alors escomptée.

⁶⁹ Terres non couvertes par de la forêt primaire, principalement des pâturages dégradés

Selon le rapport du CGEE ce développement de la filière devait permettre de créer 9 millions d'emplois (directs, indirects et induits), de créer plus de 1000 usines et de contribuer à une augmentation de 13% du PIB.

V.1 - La récolte mécanique génère un nouveau gisement de biomasse, il est le terreau d'un nouveau cycle d'innovation, celui de la transition agroécologique

La récolte mécanique sans mise à feu des champs permet de laisser au sol entre 10 et 20 tonnes de résidus végétaux de canne à sucre par hectare, contre 3 tonnes par hectare en récolte manuelle⁷⁰. C'est le point de départ d'une possible transition agroécologique du modèle qui permet de régénérer les sols tropicaux ; de reconstruire le capital naturel⁷¹.

Les pratiques agronomiques conventionnelles, mécanisation et labour, compromettent ces bénéfices⁷² ⁷³. Importées de l'agriculture occidentale, elles permettent de ponctuellement accroître la fertilité des sols en stimulant la minéralisation qui libère des éléments nutritifs⁷⁴ ; cette méthode convient aux sols occidentaux même si elle les appauvrit sur le long terme mais en climat tropical, où la minéralisation est naturellement intense, le labour expose les sols à un risque d'épuisement rapide suivi de destruction par une érosion accélérée. L'agriculture sans labour, sous couvert végétal (SCV) se développe beaucoup en milieux tempérés, elle est particulièrement adaptée aux sols tropicaux. Au Brésil la majorité du soja est déjà cultivé en systèmes SCV.

La mécanisation de la récolte de canne à sucre est un préalable à la transition vers une culture de la canne en SCV car elle permet de laisser la biomasse foliaire au sol, lorsque la récolte à la main nécessite le passage des champs par le feu pour brûler cette biomasse qui entrave le passage des coupeurs. Cependant, une transition complète vers un système de culture de la canne en SCV nécessite que l'ensemble des pratiques mais surtout des outils et moyens de cette agriculture soient repensés pour, notamment, ne pas compacter les sols.

Un virage qui s'appuie sur une transition initiée depuis les années 1990

L'objectif de transition écologique du modèle brésilien de la canne à sucre - officialisé en 2007 - se développe sur un « terreau » préexistant : l'abandon de la récolte à la main pour la récolte mécanique et

⁷⁰ (De Oliveira, Trivelin, Penatti, & De Cássia Piccolo, 1999; Z. M. De Souza, Prado, Paixão, & Cesarin, 2005; Vitti et al., 2011)

⁷¹ Le *mulch* ainsi laissé, constitué des débris de coupe, protège le sol de l'érosion et restaure sa fertilité naturelle. Ce tapis végétal entretient un microclimat : les amplitudes thermiques du sol sont réduites, la teneur en eau et la matière organique sont augmentées respectivement de 50% et de 25% dans l'horizon de sol supérieur. La couche de matière organique laissée au sol permet également d'agir comme une éponge, de ralentir la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol ce qui permet in fine à ce dernier d'en stocker d'avantage et de limiter le ruissellement de surface. Ces améliorations physiques et organiques du sol se traduisent par un accroissement de la productivité agricole.

⁷² Pratiqué en moyenne tous les 5 ans en culture de canne conventionnelle, le labour vide le sol de son stock de carbone organique pour le transformer en carbone atmosphérique. Le retournement d'une terre de culture de canne à sucre (labours pré-réforme) entraîne l'émission de 8,4 tonnes de CO₂ par hectare. D'après les travaux de La Scalla et al., (2006), cités par (Carvalho, Braunbeck, & Chagas, 2012)

⁷³ La récolte mécanique de la canne à sucre entraîne une réduction significative de la porosité du sol qui passe en moyenne de 48,6% à 39,8% sur les 5 premiers centimètres (Bolonhezi, 2015). La compaction du sol liée au trafic des véhicules sur les champs de canne à sucre est observable jusqu'à une profondeur de 40cm (Håkansson, Voorhees, & Riley, 1997; Vasconcelos, 2002). La compaction des sols détruit leur écosystème vivant qui en assure la fertilité, leur productivité agricole décroît.

⁷⁴ par le déstockage de carbone organique, la stimulation de la respiration du sol et la minéralisation du carbone du sol

l'arrêt de la pratique de mise à feu des cultures de cannes avant récolte. Cette transition, motivée par des revendications environnementales et de santé publique date de la fin des années 1990 mais n'est dans les fait que très minoritaire au milieu des années 2000.

En réponse aux plaintes de la société civile concernant les nuisances imposées par les feux de champs de canne, le gouvernement de l'Etat de São Paulo a tenté à différentes reprises et dès le début des années 1990 de légiférer pour imposer une transition mécanique de la récolte : en 1997, 2000 et 2002, sans grand succès. La situation change en 2007, lorsque l'essor des marchés internationaux de l'éthanol et les exigences des importateurs sur les critères environnementaux convainc entreprises productrices de canne et gouvernement de l'enjeu commercial de la transition mécanique. Un nouvel accord, beaucoup plus ambitieux⁷⁵, fut passé et fut un véritable succès⁷⁶.

Une machine agricole nouvelle pour inverser le paradoxe culturel de la canne à sucre

En important les méthodes et les outils agricoles de l'occident, les pays tropicaux ont adapté leurs sols et leurs cultures à des machines et des pratiques qui n'étaient pas conçues pour eux ; l'enjeu du CTB est d'inverser ce paradoxe culturel : adapter les machines et les méthodes de cultures aux spécificités des sols tropicaux.

L'une des missions du CTBE consiste à inventer une machine légère – pour limiter la compaction – qui permette de planter de la canne à sucre sans labour mais aussi de la récolter dans des conditions et à des échelles industrielles. Fidèle à la méthode historique du modèle brésilien, le projet, développé au CTBE par l'unité de recherche « mécanisation de faible impact », associe recherche publique et industriels privés⁷⁷.

Une agriculture qui reconstitue les sols et stocke du CO2 atmosphérique

La transition agroécologique du SIT de la canne consiste en deux grandes étapes dont la seconde, le passage à une agriculture sous couvert végétal (SCV) et sans labour, n'est encore qu'au stade expérimental. Cette seconde étape permet de pérenniser les bénéfices liés au maintien au sol d'un mulch organique que permet la première, la mécanisation de la récolte.

⁷⁵ L'avancement de la date limite pour la transition mécanique de 2021 à 2014 avec un engagement à avoir opéré 70% de cette transition pour 2010.

⁷⁶ Sur 80% de la surface cultivée en 2012, puis 100% de la surface cultivée en 2014 avait été opéré la transition de modèle cultural dans l'Etat de São Paulo. (Revue professionnelle en ligne du secteur de la canne, <https://www.jornalcana.com.br>, consultée le 27/11/2015.)

⁷⁷ La machine en question est surnommée, d'après sa fonction, ETC : *Estrutura de Trafego Controlado* (Structure de Trafic Contrôlé) car l'innovation principale qu'elle propose est la diminution drastique des surfaces de roulage des pneus, donc des surfaces compactées. L'ETC permet de réaliser l'ensemble des opérations culturales de plantation, fertilisation et récolte ; comparativement aux machines conventionnelles de l'agriculture industrielle mécanisée elle permet de réduire la surface de sol compacté de 60 % à 13 % Le projet a été financé à hauteur de 16 millions de R\$ par le gouvernement fédéral brésilien (soit environ 6 millions de US\$), libérés par le fonds technologique de la BNDES. L'entreprise partenaire est l'industriel brésilien, JACTO, équipementier agricole, l'objectif est la production à échelle commerciale de la machine agricole à horizon 2019. Selon les simulations du CTBE, l'ETC doit permettre une réduction globale du coût de la récolte de 50% (rien que sur le plan de la consommation de carburant, l'ETC permet de faire passer la consommation induite par la récolte d'une tonne de canne de 1 à 0,6 litres de gasoil). Enfin, la capacité journalière de récolte est prévue à 3000 tonnes, contre 700 tonnes par les machines conventionnelles.

En conditions expérimentales, différentes catégories de bénéfices pour le sol sont mesurées sur les plans physique⁷⁸, chimique⁷⁹ et biologique⁸⁰. L'enrichissement des sols en carbone que permet cette transition permet de rendre aux sols leur fonction de **puits de CO2 atmosphérique**⁸¹. La dynamique de stockage de CO2 perdure jusqu'à ce que la respiration des microorganismes du sol génère autant de carbone atmosphérique que le sol n'en absorbe, soit entre plusieurs dizaines d'années et plusieurs siècles selon le contexte pédoclimatique⁸², le sol est alors à l'équilibre.

Mais l'agriculture en SCV est une technique de culture récente, surtout pour la canne à sucre, la somme des savoirs disponibles demeure faible notamment pour l'analyse des risques et la précision du modèle économique. L'un des principaux réglages à réaliser dans le contexte d'une bioindustrie en émergence est de déterminer l'arbitrage entre la biomasse destinée à la valorisation industrielle⁸³ et celle à des fins d'enrichissement du sol en matière organique.

VI – Années 2010, une transition qui se cherche

La transition mécanique de la récolte de canne à sucre a été un succès massif : en moins de 5 ans, plus de 95% des exploitations des grands états producteurs avaient réalisé le passage d'une récolte manuelle impliquant la mise à feu des champs de canne, à une récolte mécanique permettant de laisser au sol la biomasse foliaire de la canne. Cette transition s'est faite car elle recelait un gain significatif d'économies de charges pour les producteurs, donc de compétitivité économique directe. Mais la grande transition agroécologique ambitionnée par le rapport du CGEE de 2007 s'est principalement arrêtée à cela, les machines utilisées pour la récolte de canne ne sont pas celles en cours d'innovation au CTBE, conçues pour réduire la compaction du sol et maximiser le potentiel agroécologique lié à ce nouveau gisement de biomasse. Par

⁷⁸ la couche de débris végétaux laissés au sol agit comme une couche protectrice, elle réduit l'action destructrice des gouttes de pluie et réduit le ruissellement qui emporte la matière organique et les minéraux nutritifs (P, K, Ca, Mg). La porosité des sols est améliorée et leur capacité de stockage d'eau augmente. L'accroissement des micro et macro porosités du sol sont accrues se traduit par une réduction de l'érosion d'un facteur 10 (Prove et al., 1995 cité par Bolonhezi, 2014), (Garbiate, Vitorino, Tomasini, Bergamin, & Panachuki, (2011) (Sparovek & Schnug, (2001). Z. M. De Souza et al., (2005)).

⁷⁹ les sols sont moins acides et ont une disponibilité en phosphore, phosphate, calcium et magnésium plus élevée. L'azote du sol augmente également (De 1,13 g/kg en sols soumis à système de récolte conventionnelle il passe à 2,1 g/kg en sols soumis à système de récolte mécanisée pour une valeur de référence en sol forestier de 3,14 g/kg. (R. A. Souza et al., (2012)) (R. A. Souza et al., (2012) ; (Franco, Vitti, Faroni, Cantarella, & Trivelin, 2007)

⁸⁰ l'analyse des fractions des différents types de carbones organiques traduisent que les sols sont plus riches en éléments nutritifs, plus riches en vie, mais surtout que leur fertilité est plus résiliente. Les sols peuvent nourrir les plantes plus longtemps, en leur fournissant les éléments nutritifs de manière plus régulière et sur une plus longue durée. (R. A. Souza et al., (2012)). Le développement de la vie du sol traduit également l'accroissement de sa capacité à fournir les services écosystémiques de stockage et d'épuration de l'eau, de maintien de la biodiversité.

⁸¹ Différentes études mesurent l'enrichissement en carbone de sol de canneraies ayant bénéficié d'une conversion à la culture en SCV et sans labour. Les résultats de ces études convergent autour de 1,5 tonne de carbone stocké par an et par hectare, soit un stockage équivalent de 6 tonnes par an et par hectare de CO2 atmosphérique (Segnini (2007) cité par Bolonhezi, (2014) ; Cerri et al., (2004)). Galdos et al., (2009), mesure un taux d'accumulation annuel moyen en carbone de 122 g.m⁻² de sol (soit l'équivalent d'un stockage de 4,4 t/ha.an de CO2) dans les 20 premiers cm de sol sur les terres où la pratique de mise à feu des champs a été abandonnée depuis 8 ans.

⁸² L'atteinte de l'état d'équilibre en carbone dépend des conditions climatiques et du régime d'exploitation du sol,

⁸³ L'innovation en cours au Brésil permet une valorisation croissante de la biomasse 1) dans les centrales de production d'électricité par cogénération, 2) dans les réacteurs d'hydrolyse cellulosique qui doivent permettre de produire des carburants (éthanol, diésel, kérosène) issus de matière végétale.

ailleurs les multiples pans d'une culture agroécologique de la canne n'ont pas été suffisamment incubés par les programmes de recherches, en mal de financement rapidement après leurs lancements en 2007, pour être diffusés et permettre une transformation du modèle.

Un basculement du contexte géo-économique international, anti biocarburant, associé à un changement de gouvernement au Brésil, moins favorable aux intérêts de l'éthanol, s'est traduit par une nouvelle crise du secteur. Elle illustre, encore une fois, la dépendance des filières bioindustrielles aux politiques publiques.

Entre 2000 et 2007, la filière éthanol s'est tellement développé qu'elle a occasionné une bulle financière principalement financée par de la dette, une dette internationale fondée sur l'espoir de l'ouverture des marchés occidentaux à l'éthanol brésilien et donc à la réalisation des ambitions pharaoniques du Brésil pour alimenter les marchés mondiaux des carburants en éthanol. Or les opinions publiques occidentales se sont sensiblement raidies envers les biocarburants, notamment pour leur lien présumé avec les crises alimentaires, et l'Europe comme les Etats-Unis n'ont pas donné suite à leurs velléités d'importation d'éthanol⁸⁴. En parallèle, au Brésil, les découvertes massives de pétrole offshore et l'élection de Dilma Rousseff – connue pour sa méfiance envers l'industrie de la canne, contrairement à son prédécesseur Lula – se sont traduit par un changement de paradigme de la politique économique de l'éthanol⁸⁵. La priorité donnée au contrôle de l'inflation s'est traduite par un gel des prix des carburants conventionnels à la pompe, malgré une hausse des cours du pétrole⁸⁶. Dans le même temps les coûts de production de l'éthanol augmentant, le carburant éthanol s'est retrouvé plus cher que le carburant conventionnel et les ventes d'éthanol ont baissé⁸⁷... La politique de Dilma Rousseff revenait à subventionner indirectement le carburant conventionnel au détriment de l'éthanol. La baisse structurelle de compétitivité de l'éthanol par rapport à l'essence a accéléré l'éclatement de la bulle financière de la filière et s'est traduit par une crise industrielle massive⁸⁸.

⁸⁴ Les USA ont restreint leurs objectifs d'incorporation de biocarburants et ont surtout développé les capacités de productions domestiques ; les européens ont revu à la baisse leurs objectifs d'incorporation et favorisé l'incorporation de biocarburants domestiques.

⁸⁵ Les récentes découvertes de pétrole au Brésil ont détourné les capacités publiques d'investissement du secteur de l'éthanol, 250 milliards de \$ y ont été investis par le Brésil depuis 2006 et les investissements de Petrobras dans l'éthanol carburant sont retombés à 1%.

⁸⁶ Le prix du carburant conventionnel, contrôlé par le gouvernement, a été maintenu stable durant 6 ans, entre 2006 et 2012, malgré la hausse des cours du pétrole sur les marchés internationaux, afin de limiter le risque d'inflation dans le pays. La stabilité du prix de distribution du carburant s'est faite par un ajustement à la baisse de la taxe fédérale CIDE sur les carburants de manière à compenser l'augmentation du prix de la matière première sur les marchés internationaux. Ainsi, en 2002, la CIDE était de 0,28 R\$ par litre de carburant, en 2012 elle était devenue nulle (Farina et al., 2013). Malgré la loi de libéralisation du secteur du pétrole et de la distribution de ses produits dérivés, Petrobras, entreprise dont l'Etat brésilien est actionnaire majoritaire, conserve un monopole de fait sur le secteur de la distribution du pétrole au Brésil.

⁸⁷ La consommation annuelle domestique d'éthanol hydraté est passé de 15 milliards de litres en 2009/2010 à 11 milliards en 2011/2012 (Rocha, 2013). Entre 2006 et 2009, environ 75 % des véhicules flex-fuel n'achetaient que du carburant 100% éthanol, ils n'étaient plus que 35 % en 2012, quant aux exportations, elles sont passées de près de 5 milliards de litres d'éthanol en 2009 à moins d'1 milliard en 2011

⁸⁸ Entre 2009 et 2012, 53 usines d'éthanol ont fait faillite. La baisse de rentabilité de l'éthanol sur le marché domestique lié à la politique anti-inflationniste du gouvernement, combiné au non-développement des marchés internationaux a placé les entreprises dans des difficultés de remboursement importantes. La dette du secteur sucre-énergie a atteint lors de la récolte

Le gouvernement brésilien a pris dès 2010 des mesures en réaction à cette crise, et adapté le cadre institutionnel régulant le fonctionnement de la filière éthanol⁸⁹. Mais l'époque du Proalcool est révolue et le gouvernement n'a plus les moyens d'un investissement et de mesures aussi radicales que sous l'époque de la dictature. Depuis 2011 la filière évolue dans un contexte d'hésitations du pouvoir quant au cap à donner à l'éthanol et la crise politique chronique du pays n'aide pas à le clarifier. Il n'est plus question de financer une transition agroécologique du modèle et les programmes de recherches initiés vivent en attendant un nouvel élan national, ou un terme.

Le morcellement capitaliste du modèle pose question

Historiquement nationaux, les acteurs industriels du secteur de la canne se sont depuis le milieu des années 2000 fortement internationalisés. Cet afflux de capitaux étrangers porte le développement du secteur mais nuit à la capacité de coopération des acteurs ainsi qu'à la capacité du modèle à répondre aux enjeux de prospérité nationale, comme ce fut le cas historiquement.

L'ouverture des capitaux de l'industrie brésilienne de la canne a commencé en 2006, les groupes et fonds étrangers possédaient alors 3% des capitaux des usines de transformation de canne à sucre au Brésil⁹⁰. En 2010 la part des investissements étrangers dans le secteur s'élevait à 12%, en 2012 à 33%, traduisant l'entrée de multinationales de l'agro-négoce au capital des grandes entreprises brésiliennes du sucre et de l'éthanol, tant au niveau de la production que de la transformation de la canne à sucre⁹¹. En parallèle, le secteur se concentre, trois principaux conglomérats s'articulent autour de Cosan, Crystalsev et Copersucar⁹². C'est notamment au capital de ces grands conglomérats qu'entrent les investissements étrangers, au-delà de la production de canne, de sucre et d'éthanol, ils concernent également la R&D, l'innovation. Les marchés des technologies de deuxième génération font en particulier l'objet de l'attention et, déjà, de l'investissement, des acteurs internationaux⁹³. Si les grands pays occidentaux sont les principaux acteurs étrangers à investir dans le secteur de la canne à sucre au Brésil, les émergents ne

2013/2014 la somme de 42,5 milliards de R\$, en hausse de 8% par rapport à l'année précédente. Depuis 2003, la dette globale du secteur a été multipliée par 19 alors que la production a été à peine doublée (*O estado de Sao Paulo*, 2014).

- ⁸⁹ Facilités d'accès au crédit renforcées en 2010.
- Nouvelles lignes de crédit de la BNDES pour le renouvellement des champs de canne à sucre.
- Ouverture du marché Nord-Américain de l'éthanol aux exportations du Brésil.
- Augmentation du taux d'incorporation d'éthanol anhydre dans le carburant conventionnel à 25%.
- Augmentation des prix des carburants conventionnels de 6,6% à la pompe en février 2013.
- Exemption intégrale de la taxe PIS/COFINS (0,12R\$/L) pour l'éthanol hydraté.

⁹⁰ (Oliveira, 2013)

⁹¹ Des entreprises telles que Louis Dreyfus, Tereos ou Cargill mais aussi des pétroliers comme Shell, British Petroleum et Total prennent des parts dans les usines brésiliennes.

⁹² EN 2010 ils possèdent près d'un quart des usines de transformation de la canne au Brésil (Droulers & Carrizo, 2010)

⁹³ Louis Dreyfus Commodities a racheté des parts à Crystalsev et établi des accords avec l'américain Dow Chemical pour son développement dans le secteur de la « bio-pétrochimie », en l'occurrence la production de plastique à partir d'éthanol de canne à sucre ; et Amyris, un projet orienté sur la production de diésel à partir de canne nécessitant un haut degré d'expertise technique en chimie industrielle dont le français Total est partenaire. Shell a créé avec Cosan une JV au Brésil pour la production de biocarburants de deuxième génération. Raizen est né de la fusion entre Shell et Cosan en 2010, Raizen est aujourd'hui la 5^{ème} entreprise brésilienne du secteur de la canne à sucre en termes de revenus et investit dans la R&D des technologies de deuxième génération.

sont pas en reste⁹⁴. Ces acquisitions ont stagné à partir de 2012, notamment à cause de la crise de la dette du secteur et des incohérences de pilotage public du secteur mentionnées plus haut.

De nombreux analystes brésiliens déplorent que l'éclatement capitalistique en cours nuise à la capacité de collaboration entre les acteurs du modèle.

L'exemple du CTC est souvent cité. Ce centre de recherche historique du modèle brésilien et financé par la coopérative sucrière Coopersucar a porté l'innovation variétale de canne à sucre à l'origine de la compétitivité du modèle mais surtout de sa capacité à s'adapter toujours plus finement aux contextes pédoclimatiques du pays. Le CTC a été privatisé, notamment acquis par une filiale de Shell⁹⁵ en 2013. Depuis lors le centre refuse l'accès de certains de ses sites d'expérimentation variétales aux chercheurs externes⁹⁶ alors qu'un accord le permettait et que la collaboration entre sphères publiques et privés qu'incarnait le CTC avait toujours été génératrice d'innovations et emblématique de la capacité du modèle brésilien à servir l'intérêt national.

Un autre exemple illustre la rupture de relation entre des acteurs du modèle suite à leur contrôle par des capitaux étrangers : en 2008, la vente de la « *spin 'off* » Allelyx au groupe Monsanto par Votorantim, en crise de liquidités suite à la crise financière, a entraîné l'exclusion des professeurs d'université qui présidaient au comité d'entreprise d'Allelyx. Depuis, tout contact et toute communication entre Allelyx et le reste des acteurs brésiliens de la canne est coupé.

VII – 2020, RenovaBio : poursuite d'une trajectoire d'innovation bioindustrielle ?

Malgré le non aboutissement des mesures destinées à porter la transformation agroécologique de l'industrie brésilienne de la canne, le secteur se porte bien et le pays reste le leader mondial de la production sucrière, en volumes comme en coûts. Par contre les marchés exports de l'éthanol sont dominés par les Etats-Unis, premiers exportateurs mondiaux malgré la supériorité de l'éthanol brésilien en matière de bilan CO₂, ce qui traduit le faible poids de l'argument environnemental dans le commerce international. Le potentiel économique d'un marché mondial de l'éthanol « vert » continue d'animer les réflexions industrielles du gouvernement brésilien mais son soutien à une transition vers un modèle véritablement durable, via une production agro-écologique industrielle de canne à sucre, dépend des perspectives que lui donneront les marchés internationaux.

L'accorde de Paris constitue un espoir en ce sens, il est notamment le moteur d'un nouvel élan du modèle brésilien via le programme RenovaBio. Malheureusement les gouvernements Temer puis Bolsonaro qui le pilotent ne semblent pas résolus à l'utiliser comme levier pour financer la transition agroécologique initiée sous le gouvernement Lula en 2007.

⁹⁴ Le Chinois Noble, le japonais Sojitz ou encore l'indien Renuka ont également investi dans le secteur, Renuka détient 4 usines et cible la production d'éthanol destiné à l'exportation vers l'Inde dont l'objectif est l'incorporation de 5% de biocarburant dans son mix carburant.

⁹⁵ Le CTC a notamment été confronté au problème des droits de propriétés de sa production : les résultats de ses recherches ayant été diffusés et utilisés par un nombre croissant d'acteurs non cotisants à la coopérative. Depuis le CTC contrôle et restreint l'accès à ses données.

⁹⁶ Le CTC dispose notamment d'une station expérimentale pour la création de nouvelles variétés dans l'Etat de Bahia, où les conditions climatiques sont idéales pour la floraison de la canne à sucre. Depuis que le CTC est devenu une entreprise indépendante, il a rendu payant l'accès à sa station d'expérimentation ce qui créé un conflit avec l'IAC qui a, en réaction, créé son propre banc d'expérimentation et de création génétique, sur base de financements publics.

Le Programme RenovaBio, signé par le président Temer en 2018, est la traduction officielle de l'engagement du Brésil lors des accords de Paris, réduire de 43% ses émissions de CO2 dans l'ensemble de l'économie⁹⁷. RenovaBio est un programme de quotas d'émissions de CO2 calqué sur le Programme californien LCFS (Low Carbon Fuel Standard), il doit entrer en vigueur en 2020 et cible un quasi doublement de la production d'éthanol d'ici à 2030⁹⁸. Les distributeurs de carburant se verront imposer un quota annuel de réduction d'émissions de CO2 atteignable en distribuant un volume proportionnel d'éthanol⁹⁹. Les quotas seront exclusivement produits par les usines d'éthanol certifiées selon leur performance économique. L'objectif du gouvernement est donc surtout d'accroître massivement la production d'éthanol en favorisant les usines les plus performantes (les quotas qu'elles produiront seront proportionnels à leur rendement énergétique pour la production d'éthanol, donc à leur performance industrielle¹⁰⁰) afin de réduire les coûts de l'éthanol pour restaurer sa compétitivité par rapport à l'essence conventionnelle. L'objectif est louable et traduit une demande exprimée de longue date par le secteur de la canne brésilien¹⁰¹¹⁰²¹⁰³., cependant, calibré ainsi, le RenovaBio va surtout stimuler le développement de l'éthanol selon un modèle industriel classique et basé sur l'extension d'une monoculture intensive alors qu'un gisement de valeur environnementale demeure dans la revitalisation du programme de culture agroécologique de la canne.

⁹⁷ Engagement à réduire en 2030 par rapport à 2005

⁹⁸ L'objectif est de produire 40 milliards de litre en 2030, pour près de 26 milliards produits en 2017.

⁹⁹ L'éthanol brésilien produit 8 à 11 calories renouvelables pour une calorie fossile consommée, les réductions d'émissions de CO2 entraînées par son usage sont proportionnelles. Chaque année, le gouvernement établit pour chaque distributeur de carburant un quota de réduction d'émissions de CO2, les CBios, proportionnel à ses parts de marchés.

¹⁰⁰ Selon son efficacité industrielle et énergétique, une usine d'éthanol se voit attribuer une note variant de 1 à 10 et qui détermine le nombre de CBios par unité d'éthanol produit. Un marché de CBios est créé à l'échelle nationale sur lesquels les distributeurs de carburant déficitaires ou excédentaires en CBios peuvent s'équilibrer par l'achat/vente de CBios. Les distributeurs n'ayant pas atteint les quotas fixés par le gouvernement se verront imposer une amende.

¹⁰¹ Renova Bio est le premier signal fort en faveur de l'éthanol envoyé par le gouvernement brésilien depuis l'élection d'une Dilma Rousseff réputée peu à l'écoute du secteur, probablement aussi victime d'un syndrome hollandais induit par les découvertes de pétrole en 2007. Les découvertes de pétrole de 2007 n'ont pas directement impacté le soutien public au secteur de la canne à sucre, néanmoins elles ont durant plusieurs années focalisé l'attention de la classe politique et probablement contribué à une baisse de réceptivité du gouvernement aux arguments de l'industrie de la canne.

¹⁰² Ce sujet est très sensible au Brésil, en mai 2018 les manifestations de camionneurs contre la hausse des prix des carburants ont poussé le gouvernement Temer à accorder une baisse de 13% des prix du diesel, financée publiquement afin que Petrobras n'ait pas à en supporter le coût. Cet exemple illustre que la capacité du Brésil à mettre en œuvre le Renova Bio va fortement dépendre du contexte économique international et de la volonté du gouvernement.

¹⁰³ depuis quatre ans le Brésil est importateur net de carburant, une situation responsable de difficultés financières pour Petrobras à l'origine de la libéralisation des prix de l'essence depuis octobre 2016.

Conclusion

« Il y a eu au Brésil une synergie entre le développement des biocarburants et le développement social et agricole, les biocarburants ont été un facteur de dynamisation de l'économie rurale et de renforcement de la sécurité alimentaire ». Cette citation de Lynd et al. 2015, résume significativement la proximité entre les trajectoires de développements des agroénergies et celle du pays.

Au-delà de la fonction des biocarburants pour le développement rural brésilien, nous mettons en lumière le système d'innovation que leur essor a permis de structurer, il accompagne la dynamique d'évolution du pays par l'adaptation de ses systèmes productifs aux spécificités locales de son capital naturel. Par le système d'innovation qu'elle permettent de structurer, les agroénergies, telles que développées au Brésil, sont un moteur de développement global du pays.

Plus généralement, l'histoire du modèle brésilien est riche d'enseignement pour les bio-industries en général dont le développement est souvent réalisé en substitution – donc en compétition - à un système techno-industriel conventionnel dominant. Les systèmes techno-industriels conventionnels bénéficient de générations d'innovations ayant contribué à leur compétitivité, souvent initiées sur fonds publics ; même mature, leur nature mondialisée fait qu'ils bénéficient, dans un territoire, des améliorations poursuivies ailleurs. A l'inverse les systèmes bio-industriels sont spécifiques des territoires, s'ils ont vocation à valoriser durablement les ressources locales ils n'en sont pas moins non-compétitifs initialement et doivent donc être incubés. Innovation technologique et politique sont donc consubstantiels des développements bioindustriels, et à l'inverse des systèmes conventionnels ils ne peuvent être centralisés à l'échelle mondiale mais sont spécifiques des territoires. En ce sens la bioéconomie est une voie de démondialisation compatible avec une réindustrialisation locale, elle propose nouveau paradigme de croissance économique, localisée. A l'exemple du virage agroécologique exploré par le Brésil, elle permet d'envisager des modèles productifs qui régénèrent les écosystèmes, et restaurent l'environnement.

Bibliographie

- Bolonhezi, D. (2014). AGRICULTURA CONSERVACIONISTA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR. In *Symposio para conservação do solo e da Agua para Cana-de-Açúcar*.
- Bolonhezi, D. (2015). Plantio Direto e calagem na reforma da CANA CRUA, 75–77.
- Braunack, M. V., & McGarry, D. (2006). Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. *Soil and Tillage Research*, 89(1), 86–102. <http://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.002>
- Braunbeck, O. a., & Magalhaes, P. S. G. (2006). Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, 26, 300–308. <http://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100032>
- Camargo, A. M. M. P. De, Caser, D. V., Camargo, F. P. De, Olivette, M. P. D. A., Sachs, R. C. C., & Torquato, S. A. (2008). Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias, Estado de São paulo, 2001 - 2006. *Informações Econômicas*, 38, 47–66.
- Cançado, J. E. D., Saldiva, P. H. N., Pereira, L. A. A., Lara, L. B. L. S., Artaxo, P., Martinelli, L. A., ... Braga, A. L. F. (2006). The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. *Environmental Health Perspectives*, 114(5), 725–729. <http://doi.org/10.1289/ehp.8485>
- Canellas, L. P., Velloso, a. C. X., Marciano, C. R., Ramalho, J. F. G. P., Rumjanek, V. M., Rezende, C. E., & Santos, G. a. (2003). Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(5), 935–944. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>
- Carvalho, J. L. N., Braunbeck, O. A., & Chagas, M. F. (2012). Implantação Do Plantio Direto De Cana-De-, 1–39.
- Castro Filho, C., Muzilli, O., & Podanoschi, a L. (1998). Estabilidade Dos Agregados E Sua Relação Com O Teor De Carbono Orgânico Num Latossolo Roxo Distrófico , Em Função De Sistemas De Plantio , Rotações De Culturas E Métodos De Preparo Das Amostras. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, (3), 527–538.
- Cavaliere, K. M. V., de Carvalho, L. A., da Silva, A. P., Libardi, P. L., & Tormena, C. A. (2011). Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 35(5), 1541–1549. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500008>
- Cerri, C. C., Bernoux, M., Feller, C., Correa de Campos, D., de Luca, E. F., & Eschenbrenner, V. (2004). Sucre et sequestration du carbone sugarcane and carbon sequestration. *Documentation IRD*, 20.
- Cogo, N. P., Levien, R., & Schwarz, R. a. (2003). Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(4), 743–753. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400019>
- de Moraes, M. A. F. D., & Zilberman, D. (2014). *Production of Ethanol from Sugarcane in Brazil: From State Intervention to a Free Market* (Vol. 43). book, Springer Science & Business Media.
- De Oliveira, M. W., Trivelin, P. C. O., Penatti, C. P., & De Cássia Piccolo, M. (1999). Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34(12), 2359–2362. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200024>
- De Souza, Z. M., Prado, R. D. M., Paixão, a. C. S., & Cesarin, L. G. (2005). Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 40(3), 271–278. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300011>
- Duarte Júnior, J. B., & Coelho, F. C. (2008). Adubos verdes e seus efeitos no rendimento da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. *Bragantia*, 67(3), 723–732. <http://doi.org/10.1590/S0006-87052008000300022>
- Embrapa. (2009). Zoneamento agroecológico da cana de açúcar.
- Franco, H. C. J., Vitti, A. C., Faroni, C. E., Cantarella, H., & Trivelin, P. C. O. (2007). Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma de áreas com cana-de-açúcar. *STAB*, 25(6). article.
- Galdos, M. V., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. (2009). Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, 153(3–4), 347–352. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.025>
- Garbiate, M. V., Vitorino, A. C. T., Tomasini, B. A., Bergamin, A. C., & Panachuki, E. (2011). Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 35(6), 2145–2155. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600029>

- Garside, a L., & Bell, M. J. (2001). Fallow legume in the australian sugar industry review of recent research findings and implications for the sugarcane cropping system. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol*, 23, 230–235.
- Gava, G. J. D. C., Trivelin, P. C. O., De Oliveira, M. W., & Penatti, C. P. (2001). Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 36(11), 1347–1354. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100004>
- Giraud, P.-N., & Loyer, D. (2006). Capital naturel et développement durable en Afrique. In *A quoi sert d'aider le Sud, Economica* (Vol. 33, pp. 1–22).
- Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1(1), 6. <http://doi.org/10.1186/1754-6834-1-6>
- Håkansson, I., Voorhees, W. B., & Riley, H. (1997). Proceedings 11th Conference of ISTRO: Tillage and Traffic in Crop Production Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research*, 11(3), 239–282. article. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90003-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(88)90003-7)
- Kaup, F., Nitsch, M., & Menezes, T. (2011). Brazil's aspiration for a massive worldwide substitution of gasoline by 2025. In *Nordic Bioenergy Conference* (pp. 1–11).
- Kingwell, R., & Fuchsichler, A. (2011). The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agricultural Systems*, 104(7), 513–521. article.
- Macedo, N. M., Botelho, P. S. M., & Campos, M. B. S. (2003). Controle químico de cigarrinha-da-raiz em cana-de-açúcar e impacto sobre a população de artrópodes. *Stab Açúcar, Álcool Subprodutos*, 21.
- Magalhães, P. S. G., Nogueira, L. A. H., Canatarella, H., Rossetto, R., Franco, H. C. J., & Braunbeck, O. A. (2012). *Agro-industrial technological paths, in Sustainability of sugarcane bioenergy. CGEE report.*
- Manzatto, C. V. (2008). Zoneamento agroecológico da cana de acucar.pdf.
- Materechera, S. a. (2009). Tillage and tractor traffic effects on soil compaction in horticultural fields used for peri-urban agriculture in a semi-arid environment of the North West Province, South Africa. *Soil and Tillage Research*, 103(1), 11–15. <http://doi.org/10.1016/j.still.2008.09.001>
- Meyer, J. H., & Wood, R. A. (2001). The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: a review. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 75, 242–247.
- Moraes, M. A. F. D. de. (2007). O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. *Economia Aplicada*, 11(4), 605–619. article.
- Nass, L. L., Pereira, P. A. A., & Ellis, D. (2007). Biofuels in Brazil: An overview. *Crop Science*, 47(6), 2228–2237. <http://doi.org/10.2135/cropsci2007.03.0166>
- Nogueira, L. A. H., Seabra, J. E. A., Best, G., Leal, M., & Poppe, M. K. (2008). Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. *BNDES, Rio de Janeiro*, 316. article.
- North, D. C., & Hart, E. (2006). *Custos de transação, instituições e desempenho econômico.* book, Instituto Liberal Rio de Janeiro.
- Paulino, a. F., Medina, C. C., Azevedo, M. C. B., Silveira, K. R. P., Trevisan, a. a., & Murata, I. M. (2004). Escarificação de um latossolo vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 28(5), 911–917. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500013>
- Pedro, G. (2013). Mapeamento dos esforços tecnológicos dos programas de melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil . Resumo. In *XV Congresso Latino Iberoamericano de gestao de Tecnologia.*
- Rossetto, R., Cantarella, H., Dias, F. L. F., Landell, M. G. A., & Vitti, A. C. (2008). Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. *Informações Agronômicas.*
- Shikida, F., Junqueira, C. P., & Sterchile, P. (2007). Mudanças no padrao tecnologico do corte de cana-de-açúcar: uma analise preliminar do caso paranaense. *Ciencias Empresariais Da Unipar*, 7–32.
- Silva, E. (2013). Os desafios das colhedoras de cana. *Globo Rural.*
- Silva, V. R. Da, Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2000). Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural*, 30(5), 795–801. <http://doi.org/10.1590/S0103-84782000000500009>
- Souza, R. A., Telles, T. S., Machado, W., Hungria, M., Filho, J. T., & Guimarães, M. D. F. (2012). Effects of

- sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155(July), 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.012>
- Souza, G. S. De, Souza, Z. M. De, Barboza, R., Barbosa, R. S., & Araújo, F. S. (2014). Effects of Traffic Control on the Soil Physical Quality and the Cultivation of Sugarcane (1), (1), 135–146.
- Sparovek, G., & Schnug, E. (2001). Soil tillage and precision agriculture a theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. *Soil and Tillage Research*, 61(1–2), 47–54. [http://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00189-1](http://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00189-1)
- Streck, C. A., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. (2004). Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, 34(3), 755–760. <http://doi.org/10.1590/S0103-84782004000300016>
- Tim, L. C. (2002). *Efeito do manejo da palha da cultura da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo. Piraicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Tese de doutorado.*
- Torquato, S. A. (2013). Mecanização da colheita da cana-de-açúcar : benefícios ambientais e impactos na mudança do emprego no campo em São Paulo , Brasil Mechanized sugarcane harvesting : environmental benefits and impacts on the rural.
- Torquato, S., Fronzagila, T., & Martins, R. (2008). Colheita Mecanizada e Adequação da Tecnologia nas Regiões Produtoras de Cana-de-açúcar. *CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA TECNOLÓGICA, 2008, Campina Grande.*, 1–15. Retrieved from <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/855892/1/5ColheitaMecanizadaAdequacaoTecnologia.pdf>
- Tullberg, J. N., Yule, D. F., & McGarry, D. (2007). Controlled traffic farming—from research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 272–281. article.
- UNICA. (2013). *Projeto renovação qualifica trabalhadores do corte da cana.*
- Vasconcelos, A. C. M. (2002). *Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.*
- Veiga Filho, A. de A. (2007). Comentários sobre aspectos técnicos e políticos das queimadas de cana de açúcar. *Pesquisa E Tecnologia.*
- Vezzani, F. M., & Mielniczuk, J. (2011). Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 35(1), 213–223. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>
- Virgílio, M. (2009). COLHEITA MECÂNICA DA CANA-DE-AÇÚCAR : ALGUNS PARÂMETROS Sugarcane Mechanical harvesting : Some parameters, 197–203.
- Vitti, A. C., Franco, H. C. J., Trivelin, P. C. O., Ferreira, D. A., Otto, R., Fortes, C., & Faroni, C. E. (2011). Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46(3), 287–293. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>
- Wood, A. W. (1991). Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in North Queensland. *Soil Tillage.* article.
- Yule, D., & Chapman, W. (2011). Controlled Traffic Farming – more productivity , sustainability and resilience. *Wcca*, (4068), 179. Retrieved from http://aciarr.gov.au/files/node/13991/controlled_traffic_farming_21047.pdf