



HAL
open science

Adaptation des populations animales aux systèmes d'élevage tropicaux

Nathalie Mandonnet

► **To cite this version:**

Nathalie Mandonnet. Adaptation des populations animales aux systèmes d'élevage tropicaux : Analyser la variabilité génétique en vue de sélectionner et de comprendre les gènes et mécanismes impliqués. Sciences du Vivant [q-bio]. Université des Antilles et de la Guyane, 2009. tel-02816326

HAL Id: tel-02816326

<https://hal.inrae.fr/tel-02816326>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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



UNIVERSITÉ DES ANTILLES ET DE LA GUYANE

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Soutenue le 16 décembre 2009

ADAPTATION DES POPULATIONS ANIMALES AUX SYSTEMES D'ELEVAGE TROPICAUX

*Analyser la variabilité génétique en vue de sélectionner et de
comprendre les gènes et mécanismes impliqués*

NATHALIE MANDONNET
CHARGÉE DE RECHERCHE 1^{ÈRE} CLASSE
INRA – UNITÉ DE RECHERCHES ZOOTECHNIQUES

MEMBRES DU JURY

MR. LEO DEMPFLÉ	PROFESSEUR, UNIV. TECHNOL. MUNICH – PRESIDENT
MR. DANY GARANT	PROFESSEUR UNIV. DE SHERBROOKE – RAPPORTEUR
MME. JULIETTE RAVIN-SMITH	MAITRE DE CONFÉRENCES, UAG – RAPPORTEUR
MR. ETIENNE VERRIER	PROFESSEUR, AGROPARISTECH – RAPPORTEUR
MR. ABEL HIOL	PROFESSEUR UAG – EXAMINATEUR

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION	3
1.1. ENJEUX DE L'ADAPTATION DES ANIMAUX D'ELEVAGE EN MILIEU TROPICAL	3
1.2. DEFINITION DE L'ADAPTATION GENETIQUE & CHOIX DES MODELES D'ETUDE	4
1.3. CONCEPTS DE BASE & HYPOTHESES POUR L'ETUDE DE LA GENETIQUE DE L'ADAPTATION.....	4
<hr/>	
CHAPITRE 2 COMPRENDRE LA RESISTANCE GENETIQUE AUX STRONGLES CHEZ LES CAPRINS.....	6
2.1. INTERET DU CARACTERE DE RESISTANCE GENETIQUE AUX STRONGLES	6
2.1.1. Impact zootechnique et économique des strongyloses	7
2.1.2. Concevoir une lutte intégrée	7
2.2. ANALYSER LA VARIABILITE GENETIQUE DE LA RESISTANCE AUX STRONGLES.....	9
2.2.1. Analyser la variabilité génétique disponible pour la sélection sur la résistance en caprin Créole	9
2.2.1.1. Est-il possible de sélectionner sur la résistance aux SGI en caprin? Avec quels critères ?....	9
2.2.1.2. La résistance autour du part est-elle sous le contrôle des mêmes gènes que pendant la phase post-sevrage?.....	10
2.2.1.3. Comment combiner une sélection sur la résistance avec d'autres objectifs?	11
2.2.1.4. Mise au point d'un protocole d'évaluation génétique de la résistance aux strongles.....	12
2.2.2. Analyser la variabilité génétique disponible pour la sélection sur les caractères de production en caprin Créole	12
2.3. ETUDIER LE DETERMINISME GENETIQUE ET LES MECANISMES DE RESISTANCE AUX STRONGLES	14
2.3.1. Intérêts du modèle de la chèvre Créole	14
2.3.2. Détecter des gènes de résistance	15
2.3.3. Comprendre les mécanismes de résistance.....	17
<hr/>	
CHAPITRE 3 COMPRENDRE L'ADAPTATION GENETIQUE DANS D'AUTRES ESPECES.....	19
3.1. ADAPTATION DU PORC LARGE-WHITE A LA CHALEUR.....	19
3.2. ADAPTATION DU BOVIN CREOLE AU PATURAGE	19
<hr/>	
CHAPITRE 4 CONCEVOIR DES SCHEMAS D'AMELIORATION GENETIQUE « PETITS RUMINANTS » DANS LES DFA.....	21
4.1. CONCEVOIR UN SCHEMA DE SELECTION COMBINANT RESISTANCE ET PRODUCTION EN CAPRIN.....	21
4.1.1. Réflexion sur la création et la diffusion du progrès génétique en petits ruminants en zone tropicale	21
4.1.1.1. Quels objectifs et critères de sélection faut-il retenir ?.....	21
4.1.1.2. Vaut-il mieux opter pour une stratégie intra-race ou du croisement?	22
4.1.1.3. Quelle organisation pratique adopter pour diffuser le progrès génétique ?.....	22
4.1.2. Description des systèmes d'élevage et attente des éleveurs en Guadeloupe et en Martinique	23
4.1.3. Actions d'accompagnement des professionnels caprins en Guadeloupe	24
4.2. APPUI AU SCHEMA OVIN MARTINIK	25

CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	27
5.1. INTEGRER LA RESISTANCE AUX STRONGLES DANS LES OBJECTIFS DE SELECTION CHEZ LE CAPRIN CREOLE.....	28
5.2. IDENTIFIER LES GENES DE RESISTANCE AUX STRONGLES EN CAPRIN	28
5.3. COMPRENDRE LES MECANISMES DE RESISTANCE AUX STRONGLES EN CAPRIN	28
5.4. COMPRENDRE LA RELATION GENETIQUE ENTRE LA RESISTANCE AUX STRONGLES ET CELLE A LA COWDRIOSE EN CAPRIN	29
5.5. COMPRENDRE LA REGULATION GENETIQUE DE L'ALLOCATION DES NUTRIMENTS ENTRE FONCTIONS VITALES ET DE PRODUCTION ..	29

Chapitre 6 REFERENCES CITEES	31
---	-----------

CHAPITRE 7 ANNEXES.....	34
7.1. CURRICULUM VITAE.....	34
7.2. LISTE BIBLIOGRAPHIQUE	39

INTRODUCTION

Ce texte constitue une synthèse de mes travaux de recherche dont la liste est présentée en annexe. Mon parcours professionnel au sein de l'INRA de 1995 à 2009, est également décrit en annexe. Dans tout le document, je citerai en priorité mes publications scientifiques (acceptées ou soumises) sous la forme [Nom et al., année]. Pour les travaux non encore publiés, j'indiquerai les communications présentées dans des congrès.

Mon programme de recherche « Adaptation génétique des populations animales aux systèmes d'élevage tropicaux » présenté ici, s'inscrit dans le projet de l'Unité de Recherches Zootechniques (URZ) à laquelle je suis rattachée (Figure 1). Ce projet part du postulat qu'« en milieu tropical et insulaire, il est impossible de s'affranchir des contraintes du milieu sans un coût économique et environnemental élevé ». Notre mission est donc de concevoir des systèmes d'élevage qui optimisent la productivité animale et végétale, en limitant les intrants et réduisant le coût environnemental des pratiques agricoles. Les outils de la sélection animale sont valorisés à cette fin. Ma mission s'inscrit dans l'axe stratégique E de l'INRA (*Adapter les espèces, les pratiques et les systèmes de production agricole*). Mon programme de recherche contribue également à l'axe A1.3 (*Adaptation de l'animal à des milieux à fortes contraintes*) des priorités INRA/CIRAD de recherches en productions animales en régions chaudes et incrémente le champ thématique 2 (*Variabilité génétique des phénotypes*) du département de Génétique Animale. Il tire parti des réflexions menées à tous ces niveaux à l'INRA.

1.1. ENJEUX DE L'ADAPTATION DES ANIMAUX D'ELEVAGE EN MILIEU TROPICAL

Les milieux tropicaux et subtropicaux sont soumis à une forte croissance démographique. Entre 2005 et 2050, la population des pays du Sud progresserait de 50 % pour atteindre 7,8 milliards d'habitants (Genin, 2006) tandis que celle des pays développés devrait stagner (1,2 milliards d'habitants). Cet accroissement démographique devrait s'accompagner d'une augmentation de la demande alimentaire, notamment en produits carnés (Delgado *et al.*, 1999). Ce contexte particulier milite pour l'intensification des systèmes de production agricoles. La production mondiale de viande, toutes espèces confondues, a presque doublé depuis les années 1980, passant d'environ 136 000 à plus de 260 000 milliers de tonnes en 2004 (FAO Statistics Division, 2007). Cet accroissement touche aussi l'élevage des petits ruminants (*Capra hircus* et *Ovis aries*). Avec un cheptel mondial en continuelle augmentation (de 1,55 milliards dans les années 80 à 1,89 milliards de têtes en 2005; FAO Statistics Division, 2007), leur marché représente une part de plus en plus importante de l'économie mondiale, et plus particulièrement de l'économie des pays de Sud. Cette progression demeure malgré tout insuffisante au regard des besoins.

En effet, dans ces régions, les contraintes environnementales représentent un frein au développement de la production animale. Les aléas climatiques entraînent des tensions sur la sécurité alimentaire avec des conséquences négatives majeures pour les populations et pour le développement durable (Morton, 2007). Les températures et taux d'humidité élevés éprouvent les

organismes, entraînent des disponibilités en aliments variables en quantité et en qualité et favorisent une grande variété de maladies (notamment parasitaires). Cette vulnérabilité devrait s'accroître au cours des prochaines décennies avec le réchauffement climatique amorcé (GIEC, 2007). L'adaptation de l'agriculture aux contraintes du milieu devient donc un enjeu primordial en zone tropicale, comme dans les régions tempérées.

1.2. DEFINITION DE L'ADAPTATION GENETIQUE & CHOIX DES MODELES D'ETUDE

L'adaptation en élevage est un terme très général qui décrit la faculté d'un animal à faire face aux contraintes de l'environnement, en ajustant son fonctionnement à différents niveaux d'organisation (comportement, nutrition, physiologie, métabolisme...). L'objectif est de maintenir son bien-être et garantir sa survie (homéostasie) et celle de sa descendance (homéorhèse). Si le stress est d'une durée limitée dans le temps, on parle d'acclimatation. Dans le cas d'une population soumise à un stress de façon continue, des combinaisons de gènes conférant une meilleure adaptation peuvent être sélectionnés : trypanotolérance des bovins N'Dama et Baoulé (Dayo et al., 2009), faculté à supporter la sous-nutrition et le stress thermique des bovins zébus (Morand-Fehr et Doreau, 2001)... On parle alors d'adaptation génétique. La productivité de l'élevage en régions tropicales ne pourra être durablement garantie sans valoriser cette adaptation génétique naturelle chez les races indigènes (Wilson, 1998) ou, du moins, sans prendre en compte les caractères d'adaptation dans les objectifs de sélection des races locales adaptées ou des races exotiques spécialisées (Baker et Rege, 1994).

L'objectif de mes recherches est de lever, ou d'atténuer, certaines contraintes pesant sur les systèmes d'élevage tropicaux via l'amélioration génétique. Dans nos conditions tropicales humides, **la chaleur** a été identifiée comme premier facteur limitant la production de porcs et **le parasitisme** comme principal frein à la production de ruminants (Over et al., 1992), tous deux affectant les performances et la rentabilité économique des élevages. Le choix de ces facteurs limitants est également justifié par leur importance au niveau mondial. Aux Etats-Unis, les pertes annuelles liées aux effets de la chaleur chez le porc s'élèvent à 300 millions de dollars pour la profession. Par ailleurs, les pertes économiques attribuées aux strongles gastro-intestinaux, combinant les baisses de production et les coûts associés aux méthodes de lutte, étaient estimés en 1995 à 222 millions d'US dollars chez le principal pays producteur de petits ruminants, l'Australie (McLeod, 1995). Enfin, la tique *Amblyomma variegatum* occasionne des pertes importantes aux ruminants en inoculant, *Ehrlichia ruminantium*, parasite sanguin très pathogène pour les petits ruminants, ou *Dermatophilus congolensis* causant des lésions sévères de la peau chez tous les ruminants. En 1987, dans le seul département de la Guadeloupe, les pertes annuelles directes et indirectes, évaluées par le coût de la lutte contre le parasite *A. variegatum*, furent estimées à 1,5 millions de dollars US (Barré, 1989).

1.3. CONCEPTS DE BASE & HYPOTHESES POUR L'ETUDE DE LA GENETIQUE DE L'ADAPTATION

Il existe deux façons de prendre en compte les caractères d'adaptation en vue de l'amélioration génétique d'une population animale : la démarche globale et la démarche analytique. La *démarche globale* analyse la variabilité des performances de production classiques (reproduction, croissance, carcasse) dans un milieu contraignant, tandis que la *démarche analytique* étudie la

variabilité du caractère d'adaptation et la met ensuite en relation avec les caractères de production. La démarche globale est la plus simple à mettre en œuvre car elle utilise les contrôles de performances classiques. Cependant, le progrès génétique qu'elle génère est plus lent si les contraintes environnementales varient. Une année favorable pour l'élevage, un reproducteur moins adapté au stress peut être retenu pour la reproduction, réintroduisant ainsi des allèles de sensibilité dans la population. La démarche analytique est dans un premier temps plus complexe que la démarche globale car de nombreuses connaissances sont à réunir sur le caractère d'adaptation considéré (variabilité, protocole d'enregistrement des performances, relations adaptation-production). Dans un deuxième temps en revanche, elle doit mener à la définition précise d'objectifs et de critères de sélection et donc à un progrès génétique maîtrisé.

Notre contexte tropical Caraïbe est particulièrement favorable pour l'analyse génétique des caractères d'adaptation. Nous faisons, en effet, l'hypothèse qu'il existe un fort potentiel de production en zone tropicale humide en valorisant l'adaptation des génotypes locaux et en développant des programmes d'amélioration spécifiques aux contextes socio-environnemento-économiques tropicaux. Par ailleurs, les génotypes locaux de la Caraïbe et de l'Amérique Latine du fait de leur métissage et de leur utilisation à des fins multiples, constituent potentiellement un modèle générique pour l'étude des caractères d'adaptation (Verrier et al., 2005).

Depuis 1995, ma mission de chercheur à l'URZ a été de développer la démarche analytique pour le modèle caprin/SGI - cowdriose. Les résultats de mes travaux de recherche sont décrits dans le **chapitre 2** et sont organisés en activités de recherche finalisée, activités de recherche d'amont. Depuis 2004, ma mission d'animation du groupe PGAS¹ de l'URZ m'a amenée à m'intéresser aux modèles porc/chaleur et bovin/conduite d'élevage. Mon expertise scientifique sur ces modèles est présentée dans le **chapitre 3**. Le **chapitre 4** fait état de mon expertise scientifique à des fins de développement des filières « petits ruminants » dans les DFA². Dans le **chapitre 5**, enfin, je dresse le bilan et les perspectives de mes travaux sur l'analyse génétique de l'adaptation au milieu tropical humide.

¹ PGAS = Physiologie et Génétique de l'Adaptation aux stress

² DFA = Départements Français d'Amérique

COMPRENDRE LA RESISTANCE GENETIQUE AUX STRONGLES CHEZ LES CAPRINS

En 1995, c'est par ce volet que j'ai initié le programme de recherche « résistance aux strongles chez les caprins Créoles », en faisant le choix d'une démarche analytique. La base était de bien décrire l'importance et la variabilité génétique de ce caractère d'adaptation complexe pour ensuite, développer des recherches sur les mécanismes de résistance. Je dispose aujourd'hui d'une base de données de performances conséquente et d'une bonne connaissance de la variabilité génétique du caractère, sources potentielles de collaborations.

Tous mes résultats expérimentaux sont issus du troupeau expérimental de l'INRA-Plateforme Tropicale d'Expérimentation sur l'Animal (PTEA) à Gardel. Le domaine est situé dans une zone calcaire à saison sèche marquée avec une moyenne des précipitations annuelles voisine de 1300 mm et un taux d'humidité relative toujours supérieur à 70%. Le troupeau caprin est exclusivement constitué d'animaux de type Créole acquis dans les années 70, dans les élevages de Guadeloupe.

Au cours des protocoles expérimentaux mis en place à Gardel, j'ai pu chiffrer l'impact du parasitisme et resituer l'intérêt de la résistance génétique par rapport aux autres méthodes de lutte. Cet aspect de mes travaux est présenté en introduction des résultats de l'étude finalisée de la résistance aux SGI.

2.1. INTERET DU CARACTERE DE RESISTANCE GENETIQUE AUX STRONGLES

Jusqu'à il y a 8-10 000 ans de cela, les parasites et leurs hôtes ont co-évolué en générant des structures génétiques de populations permettant le maintien des deux entités sauvages. La domestication des mammifères par l'Homme est venue rompre cet équilibre naturel (Mignon-Grasteau et al., 2005). Les animaux ont été parqués sur des surfaces restreintes ce qui a considérablement modifié l'épidémiologie des parasites gastro-intestinaux. Le détenteur d'animaux est entré petit à petit dans une logique d'augmentation de la productivité de son troupeau. L'équilibre dans l'allocation des ressources nutritionnelles de l'hôte, entre l'homéostasie (survie de l'individu) et l'homéorhèse (pérennité de l'espèce) a été déplacé vers cette dernière (Hoch et al., 2004). Les fonctions régulant la pérennité de l'espèce (reproduction, lactation,) ont été privilégiées aux dépens de celles régulant la survie de l'individu (adaptation, fitness,...). Le parasite s'est trouvé favorisé et les défenses des hôtes ont été diminuées. Toutefois, l'impact n'a pas été le même chez tous les hôtes. Il existe une variabilité individuelle dans la résistance des animaux d'un troupeau. Le parasite s'appuie sur un petit nombre d'animaux très sensibles pour réaliser rapidement son cycle et coloniser efficacement le milieu.

Les strongles gastro-intestinaux infestant les petits ruminants sont des nématodes de l'ordre des strongylida, famille des Trichostrongylidae, d'où leur nom commun de strongles. Leur cycle de développement se déroule en deux phases et n'implique qu'un seul hôte (monoxène) (Figure 2). La phase « libre ou externe » débute par l'expulsion des œufs pondus par les vers femelles dans les fèces des animaux sur le pâturage. Ensuite, deux stades larvaires successifs sont nécessaires pour

aboutir à la larve infestante, dite larve L3. L'ingestion des larves infestantes par les animaux marque le début de la « phase parasite ou phase interne ». Les larves migrent alors vers la muqueuse digestive de leur site d'implantation, où se déroulent deux mues aboutissant à l'adulte mâle ou femelle. Une fois la maturité sexuelle atteinte, le vers femelle pond ses œufs dans la lumière du tube digestif qui seront excrétés à nouveau avec les matières fécales de l'hôte.

2.1.1. IMPACT ZOOTECHNIQUE ET ECONOMIQUE DES STRONGYLOSES

L'estimation des pertes économiques liées aux strongyloses est un élément de décision pour juger de l'opportunité d'introduire le caractère de résistance dans un programme d'amélioration génétique. L'impact de la pathologie sur les caprins Créoles a été estimé aux deux points clés du point de vue épidémiologique que sont la lactation des mères et l'engraissement post-sevrage des chevreaux. En début de lactation, les chèvres Créoles manifestent une sensibilité plus marquée que les chèvres Créoles sèches [Mandonnet et al., 2005]. Cela se traduit par une excrétion d'œufs de parasites entre 4 et 7 fois supérieure et une aggravation de l'anémie. Le phénomène est plus intense chez les primipares. L'excrétion d'œufs un mois après la mise bas diminue de 1,3% par année d'âge. Plus la taille de portée est grande plus le pic d'excrétion est élevé et l'anémie marquée. Les femelles de valeur laitière inférieure à 80g/j (en gain moyen quotidien (gmq) 10-30j moyen par chevreau) sont plus infestées que celles de valeur laitière supérieure à 80g/j (Figure 3). Il semble donc que la présence des strongles diminue la production laitière. En conséquence, pour un écart de 600 OPG dans le pic d'excrétion des mères, on observe un gmq30-70 inférieur de 17% et un poids au sevrage inférieur de 1kg chez les chevreaux. Or chaque kg de poids supplémentaire au sevrage diminue d'un quart le risque de mourir d'une strongylose après sevrage [Mandonnet et al., 2003]. L'agression due aux SGI entraîne une perte de poids vif à 300 jours de 20% par rapport au potentiel qui est de 17,5kg en moyenne. La présence des parasites empêche la reprise de la croissance à 180 jours consécutivement au stress du sevrage. Si l'on tient compte de la mortalité induite durant la période d'engraissement, la production est alors amputée de 31% de poids vif ce qui représente une perte de 35 € par animal de 1 an produit. En rapportant ce taux moyen à la production caprine de Guadeloupe, on estime les pertes économiques dues aux strongles à environ 0,23 millions € par an (soit 0,35 millions de US dollars).

Nos différents résultats montrent que le contrôle du parasitisme des chèvres en début de lactation et des chevreaux en période d'engraissement à l'herbe entraînerait une augmentation substantielle de la productivité du troupeau. La production laitière des mères et le poids au sevrage des chevreaux apparaissent comme des facteurs clé, à prendre en compte dans les programmes d'encadrement technique et de sélection.

2.1.2. CONCEVOIR UNE LUTTE INTEGREE

Jusqu'à très récemment, la stratégie de lutte contre ces parasites tendait à leur éradication, du moins de façon temporaire, des troupeaux. Ceci a conduit à l'apparition des résistances multiples aux anthelminthiques sous toutes les latitudes (Sangster, 1999). En Guadeloupe par exemple, l'apparition sur le site expérimental de Gardel de souches d'*H. contortus* résistant à l'ivermectine et de *T. colubriformis* résistant au lévamisole a souligné la gravité du phénomène : il ne restait alors qu'une molécule active sur les deux espèces. De plus, ces traitements sont coûteux et polluants (résidus dans la viande, le lait et l'environnement). Depuis quelques années, on est passé à une logique de manipulation des équilibres hôtes-parasites dans les systèmes

pâturés [Mahieu et al., 2009] par combinaison de diverses stratégies: traiter de façon ciblée les animaux les plus sensibles, limiter les opportunités de rencontre entre l'hôte et le parasite, renforcer les défenses de l'hôte.

La première stratégie vise à **traiter de façon ciblée** les animaux les plus malades. La méthode Famacha© (Bath et al., 1996) [Mahieu et al., 2007] diagnostique l'anémie provoquée par *H. contortus*, quand cette espèce est majoritaire et ne nécessite pas d'analyse en laboratoire. D'autres méthodes tendent à analyser les symptômes plus frustrés provoqués par des associations de strongles non hématophages (chutes anormales de croissance Besier, 2005 ; consistance des fèces Broughan et Wall, 2007). Les animaux non traités jouent alors le rôle de refuge permettant le maintien d'une population de strongles porteurs d'allèles de sensibilité aux molécules utilisées (Van Wyk, 2001). Le traitement des animaux malades peut également être conçu en utilisant des plantes à vertu anthelminthique. La phytothérapie valorise certains composés secondaires (tanins par exemple) de plantes pouvant être elles-mêmes des fourrages comme les légumineuses, des co-produits de récolte (feuilles de manioc ou de bananier) (Marie-Magdeleine et al., 2009).

La deuxième stratégie vise à **limiter les contacts entre les parasites et leurs hôtes** potentiels. En faisant pâturer simultanément ou alternativement des animaux sensibles et des résistants (petits ruminants/bovins, jeunes/adultes...), on provoque une dilution des larves infestantes sur le pâturage. Le niveau d'infestation du pâturage est alors considérablement diminué et les gains de production peuvent dépasser 10%, sans coût supplémentaire (Mahieu et al. 1997). D'autres techniques comme l'utilisation de champignons nématophages ou de microfaune coprophage (vermicompost) peut aussi permettre une réduction importante de la contamination larvaire des pâtures, mais elle nécessite en amont une production importante de spores et de compost (Chandrawathani et al., 2002 ; d'Alexis et al., 2009). Ces méthodes industrielles ne sont pas encore opérationnelles pour des systèmes d'élevage à faible niveau d'intrants.

La troisième voie de maîtrise du parasitisme vise à **augmenter les défenses naturelles de l'hôte**. Les nombreuses tentatives de mise au point de vaccin n'ont pas abouti à ce jour, en particulier à cause de la diversité des situations de polyparasitisme (Vercruyse et al., 2004). En revanche, les effets favorables d'une alimentation équilibrée sont démontrés sur la résistance des petits ruminants. Une complémentation protéique des jeunes permet de mieux supporter les effets du parasitisme et de renforcer leurs défenses immunitaires [Bambou, Gonzales-Garcia et al., 2008]. Enfin, une voie durable d'augmentation de la résistance de l'hôte passe par l'amélioration génétique. La possibilité d'une sélection a été démontrée dans de nombreuses races ovines depuis les années 40 (voir revues de Baker et al., 1992, Mandonnet, 1995 ; Chevrotière, 2007). Les résultats en caprins sont plus rares et controversés (Patterson et al. 1996 ; Baker et al., 1998). Des bénéfices économiques sont attendus de l'introduction du caractère de résistance dans un schéma de sélection (croissances plus rapides, moins de mortalité, meilleure récupération des femelles après chaque lactation...).

Il revient à chaque éleveur de **combiner ces stratégies** selon son niveau de technicité et l'organisation de son élevage. L'URZ développe des recherches sur ces voies de maîtrise du parasitisme et les met en œuvre au Domaine expérimental de Gardel. Des systèmes d'élevage combinant plusieurs méthodes sont en démonstration pour les éleveurs et sont comparés avec le système classique reposant uniquement sur des traitements anthelminthiques. L'intérêt de la résistance génétique des caprins Créoles est évalué dans ces systèmes.

2.2. ANALYSER LA VARIABILITE GENETIQUE DE LA RESISTANCE AUX STRONGLES

La résistance aux strongles recouvre différents phénomènes biologiques. Au sens strict, la résistance se définit comme la capacité d'un animal à limiter la taille de la population vermineuse hébergée, c'est-à-dire à prévenir l'établissement de larves et/ou à provoquer leur élimination rapide et celles des adultes. Le nombre de vers installés est l'évaluation la plus juste et la plus directe de la résistance d'un animal, mais elle ne peut se mesurer qu'après abattage. Elle est donc difficilement envisageable dans un projet de sélection. De ce fait, le critère de sélection le plus fréquemment retenu comme indicateur phénotypique de résistance est l'excrétion d'œufs exprimée en nombre d'œufs par gramme de fèces (Baker, 1997). C'est une estimation indirecte de la charge parasitaire de l'animal et une évaluation de son pouvoir contaminateur, c'est-à-dire du nombre d'œufs émis sur le pâturage et susceptibles de réinfester un autre animal. La résistance/sensibilité d'un animal au sens strict ne préfigure pas systématiquement de sa tolérance, aptitude de l'animal à survivre aux effets pathogènes du parasitisme (Albers *et al.*, 1987), ni de sa résilience, aptitude de l'animal à maintenir sa production en niveau subclinique d'infestation. Or ces dernières acceptations sont les plus « parlantes » en termes de productivité d'élevage.

2.2.1. ANALYSER LA VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE DISPONIBLE POUR LA SÉLECTION SUR LA RÉSISTANCE EN CAPRIN CRÉOLE

Depuis les années 1930-1940, de nombreux travaux ont rapporté des variations de résistance aux SGI entre races chez les ovins ou les caprins (Baker et Gray, 2004). La majorité des recherches récentes se sont attachées à quantifier la variabilité génétique disponible intra populations ovines (de la Chevrotière, 2007). Les résultats suggèrent une héritabilité moyenne de la résistance (0.1-0.5), quel que soit le mode d'infestation ou l'espèce de parasite. Les critères de mesure classiques de la résistance sont l'excrétion d'œufs (OPG) et l'hématocrite. Dans le cas des caprins, les études sont peu nombreuses et parfois contradictoires. Certaines concluent à l'absence de variabilité génétique (Woolaston et al., 1992) et d'autres à la possibilité de sélectionner efficacement (Baker et al., 2001).

Nos travaux sur la résistance génétique aux SGI chez les caprins Créoles ont débuté en 1995, avec le phénotypage systématique des chevreaux entre le sevrage (3 mois) et la fin de la période d'engraissement au pâturage (11 mois). Ce protocole se prolonge jusqu'à aujourd'hui pour indexer les chevreaux sur le caractère de résistance à 11 mois. A partir de 2000, ces mesures ont été complétées par un protocole expérimental d'évaluation de la résistance de chevrettes primipares en début de lactation. Ces travaux s'accompagnent de la gestion génétique du troupeau expérimental (préparation des plans d'accouplements, archivage des filiations et des performances). Ces dispositifs nous ont permis d'apporter des réponses aux trois séries de questions suivantes :

2.2.1.1. EST-IL POSSIBLE DE SÉLECTIONNER SUR LA RESISTANCE AUX SGI EN CAPRIN? AVEC QUELS CRITERES?

Il est établi que la résistance aux SGI est un caractère moyennement héritable chez les caprins Créoles infestés naturellement par *H.contortus* et *T.colubriformis*. Les estimations d'héritabilité

de l'excrétion d'œufs mesurée en période d'engraissement après sevrage ou en début de lactation sont du même ordre de grandeur : $0,21 \pm 0,03$ à 11 mois et $0,15 \pm 0,04$ un mois après mise bas [Mandonnet et al., 2001 ; 2006]. Ces valeurs sont conformes à celles du modèle ovin rapportées dans la bibliographie. L'augmentation de la variabilité génétique entre le sevrage et 11 mois traduit la mise en place progressive des mécanismes de résistance, au contact répété des strongles sur le pâturage, durant cette période. Les effets génétiques maternels significatifs au sevrage disparaissent en milieu d'engraissement et ne sont pas significatifs durant la lactation (Figure 4).

La résistance est un caractère complexe dont l'excrétion d'œufs ne décrit qu'une facette. Plusieurs critères sont enregistrés sur les chevreaux pour caractériser leur réaction immunitaire face à l'infestation naturelle (éosinophilie sanguine) et les conséquences pathologiques (hématocrite) de celle-ci. L'analyse de deux de ces critères a donné lieu à publication [Mandonnet et al., 2001 ; 2006]. Les critères d'hématocrite (PCV) et d'éosinophilie sanguine (EOSI) sont héréditaires. Les estimations d'héritabilité sont du même ordre de grandeur en période d'engraissement post-sevrage et en début de lactation : environ 0,15 pour PCV et 0,20 pour EOSI. Les corrélations génétiques entre l'OPG et l'hématocrite valent $-0,70 \pm 0,12$ et $0,58 \pm 0,13$ à 7 mois et 11 mois d'âge. Chez les mères en période d'allaitement, les estimations sont $-0,56 \pm 0,11$ à 4 semaines après mise bas et $-0,79 \pm 0,13$ à 6 semaines. Entre l'OPG et l'éosinophilie, elles atteignent $0,37 \pm 0,15$ et $0,68 \pm 0,17$ respectivement aux mêmes dates. Ainsi, une chèvre génétiquement peu contaminatrice du milieu présentera un index fort en hématocrite et un index faible en éosinophilie. Le taux d'éosinophilie dans la circulation générale se comporte comme un marqueur de la présence des parasites (comme OPG et PCV) et non comme l'indicateur d'une réaction protectrice de l'animal.

La réponse en immunoglobulines (Ig) sériques des caprins Créoles à l'infestation expérimentale à *H.contortus* a été étudiée sur 2 lots de chevreaux d'index d'excrétion d'œufs à 11 mois extrêmes préalablement infestés au pâturage par *H.contortus* et *T.colubriformis* puis traités [Bambou, de la Chevrotière et al., 2008]. Aucune différence dans la réponse immunitaire liée aux immunoglobulines totales circulantes n'a été mise en évidence entre animaux d'index résistants et ceux d'index sensibles. Ce résultat suggère qu'une protection s'est mise en place au préalable lors de l'infestation au pâturage. La ségrégation entre résistants et sensibles n'est donc pas liée à des niveaux de réponse humorale circulante différents. La corrélation de rang de Spearman est significative entre l'excrétion d'œufs et la sécrétion d'IgE anti-ESP ($r = 0.593$; $P < 0.05$) quelque soit le niveau d'index de résistance. Ce résultat, jamais rapporté, suggère une réaction d'hypersensibilité dépendant de la prolificité des vers femelles. Le dosage des anticorps spécifiques chez les chevreaux est entrepris afin de confirmer ces premiers résultats, d'estimer leur variabilité génétique et leur intérêt en tant que critère de résistance.

2.2.1.2. LA RESISTANCE AUTOUR DU PART EST-ELLE SOUS LE CONTROLE DES MEMES GENES QUE PENDANT LA PHASE POST-SEVRAGE?

La corrélation génétique entre l'excrétion d'œufs mesurée à 11 mois d'âge et durant la lactation varie de $0,57 \pm 0,12$ à $0,79 \pm 0,12$ [Mandonnet et al., 2006]. Ainsi, la sélection de chevreaux résistants en période d'engraissement après sevrage conduirait à sélectionner des femelles dont le pic d'excrétion autour de la mise bas serait moins marqué et moins persistant. Nous avons comparé deux stratégies de sélection (directe et indirecte) en vue de réduire la contamination du

pâturage en période de mise bas, au cours de laquelle la productivité des mères est amputée par la mortalité et les retards de croissance des chevreaux (Tableau 1). La réponse à la sélection directe de la résistance des mères serait en première approximation deux fois plus faible que la réponse indirecte à une sélection des chevreaux sur leur résistance à 11 mois [Mandonnet et al., 2006]. Une expérimentation a débuté en 2005 pour évaluer les conséquences de cette sélection, en termes de moindre contamination du milieu, de réduction du parasitisme des chevreaux et d'augmentation de la production laitière des mères. Cette expérimentation combine la sélection avec la mixité des espèces au pâturage, autre voie de maîtrise du parasitisme, menée en collaboration avec M.Mahieu dans le cadre du sous-projet « Systèmes d'élevages tropicaux » du projet d'unité [Mahieu et al., 2008].

2.2.1.3. COMMENT COMBINER UNE SÉLECTION SUR LA RÉSISTANCE AVEC D'AUTRES OBJECTIFS?

Nous vérifions en collaboration avec le CIRAD Guadeloupe (N.Vachier et T.Lefrançois UMR INRA-CIRAD 1309), si la résistance aux strongles est corrélée avec la cowdriose, seconde pathologie majeure des petits ruminants en Afrique sub-saharienne, Madagascar et certaines îles de la Caraïbe dont la Guadeloupe. L'étude de la résistance à la Cowdriose fait suite aux travaux du CIRAD EMVT dans les années 90. L'objectif est de vérifier si, en sélectionnant pour la résistance aux strongles, on augmentera (ou pas) la sensibilité des chèvres Créoles à la cowdriose. La première étape assignée en 2006-2008 était de revalider l'hypothèse selon laquelle la population caprine Créole des Saintes³ était de génotype sensible (n'ayant subi aucune pression de sélection en l'absence d'*Amblioma variegatum* dans ces îles) tandis que celle de Gardel serait porteuse de gènes de résistance (car soumise à sélection en dépit de la prophylaxie appliquée). Trente chevreaux 'Gardel' et 30 chevreaux 'Saintes' ont été produits en février 2007 à Gardel et l'UEPSA, et ont été challengés en janvier 2008 avec une dose sub létale 1 LD 70 d'*Ehrlichia ruminantium* (mise au point en août 2007) : suivis signes cliniques, sérologie et rickettsemie. Un effet de l'origine des animaux a été mis en évidence mais dans un sens inverse à celui de l'hypothèse émise [Mandonnet et al., 2008]. Une répétition de ce protocole est en cours.

Par ailleurs, nous avons estimé les relations entre la résistance aux strongles et différents objectifs de production classiques. Des relations favorables à nulles ont été estimées entre le poids au sevrage et l'excrétion d'œufs à 7 et 11 mois ($-0,44 \pm 0,12$ et $-0,08 \pm 0,11$ respectivement), ou encore avec l'hématocrite mesurée aux mêmes âges ($0,50 \pm 0,10$ et $0,20 \pm 0,13$ respectivement) (De la Chevrotière, 2007). Des corrélations nulles ont été estimées entre les croissances sous la mère et l'excrétion d'œufs à 7 et 11 mois (entre $-0,06$ et $0,16 \pm 0,20$) (Jaquot, 2008) (Figure 5). En première estimation, la relation entre résistance et prolificité est très défavorable (voisine de 0,50). Elle serait néanmoins gérable dans un schéma de sélection car l'objectif serait de canaliser la taille de portée autour de 2 chevreaux à la naissance plutôt que de l'augmenter (Jaquot, 2008). Une publication faisant la synthèse de ces résultats est en préparation (De la Chevrotière, Jaquot, Mandonnet).

Nos résultats démontrent donc la possibilité de sélectionner efficacement sur la résistance aux SGI chez les chevreaux Créoles, notamment à 11 mois où le maximum de variabilité génétique a

³ Îles appartenant à l'archipel de la Guadeloupe, indemnes de tiques *Amblioma Variegatum* et de Cowdriose.

été estimé. Les conditions de sélection sont alors favorables en l'absence de composante génétique maternelle et du fait d'une corrélation nulle avec le poids. Par ailleurs, cette sélection diminue la sensibilité des chèvres autour du part. Forte de ces conclusions, l'indexation systématique des chevreaux de Gardel sur l'excrétion d'œufs à 11 mois a débuté mi 2005. La valeur génétique des boucs est connue avec un coefficient de détermination (CD) moyen de 0,30. Cette précision est plutôt faible mais est liée à la structure familiale du troupeau et à la limitation des tailles de famille pour contenir la consanguinité. Pendant 3 reproductions successives en 2007, les 2 boucs les plus résistants ont été accouplés avec le quart des femelles les plus résistantes et idem avec les animaux sensibles. Ces accouplements ont engendré des animaux extrêmes valorisés dans les travaux sur les mécanismes de la résistance décrits au chapitre 3. Depuis 2008, grâce à cette même indexation, deux lignées divergentes sont en cours de sélection en hors sol à Duclos. Environ 70 mères (35 résistantes R et 35 sensibles S issues du troupeau de Gardel) sont accouplées tous les 8 mois avec 2 boucs résistants et 2 boucs sensibles. Les femelles sont choisies en autorenouvellement dans le troupeau R ou S. Les boucs sont issus de Gardel où ils auront été évalués comme R ou S sur descendance principalement. Les boucs sont utilisés durant 2 luttes successives puis réformés pour contenir la consanguinité dans le troupeau. La divergence est caractérisée par un test d'infestation expérimentale à *H.contortus* sur les chevreaux de 8 mois et un bilan parasitaire et mesures histologiques sur ces mêmes chevreaux mâles.

2.2.1.4. MISE AU POINT D'UN PROTOCOLE D'ÉVALUATION GÉNÉTIQUE DE LA RÉSISTANCE AUX STRONGLES

Dans l'optique d'intégrer la résistance aux strongles dans un schéma d'amélioration génétique des caprins Créoles de Guadeloupe, un protocole d'évaluation est en cours de mise au point. Le niveau d'infestation des animaux est très fluctuant au pâturage (quantité, proportion d'espèce) et l'estimation du niveau génétique des animaux nécessite de nombreuses et coûteuses mesures sur des troupeaux contemporains d'au moins 15 animaux. Nous appuyant sur des résultats obtenus lors du doctorat montrant que les mêmes gènes contrôlent la résistance de moutons Romanov en infestation mixte au pâturage (IN) et en infestation monospécifique expérimentale (IE) [Gruner et al., 2004], nous envisageons un protocole d'évaluation des caprins Créoles en infestation expérimentale hors-sol par *H.contortus*. Un protocole est en cours (2007-2009) pour estimer la corrélation génétique entre IN et IE dans nos conditions et ainsi valider le protocole d'infestation expérimentale par *H.contortus*.

En 2007, nous avons également mis en place une expérimentation pour vérifier si la complémentation alimentaire de jeunes chevrettes alimentées à base d'herbe pouvait perturber leur indexation génétique (Figure 6). Il apparaît que la complémentation modifie les écarts entre animaux résistants et animaux sensibles même au plus bas niveau de complémentation testé (22gr de protéines/jour). La complémentation sera donc proscrite au moins avant le test de résistance [Bambou et al., 2008].

2.2.2. ANALYSER LA VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE DISPONIBLE POUR LA SÉLECTION SUR LES CARACTÈRES DE PRODUCTION EN CAPRIN CRÉOLE

Les caractères de production sont enregistrés en routine sur le troupeau caprin de l'INRA Gardel. Ces performances aux différentes phases d'élevage (reproduction, croissance sous la mère et croissance post sevrage) sont le support des analyses suivantes et des estimations de corrélation

présentées dans le paragraphe 2.2.1.3. L'analyse de leur variabilité s'accompagne d'une réflexion sur les modèles mathématiques à appliquer (modèle animal, avec ou sans effets maternels, multicaractère ou régression aléatoire...) et d'une étroite collaboration entre chercheurs URZ ayant des connaissances complémentaires en zootechnie du cabri, génétique, systèmes d'élevage en milieu tropical (G.Alexandre, A.Menendez, M.Naves).

Un critère indirect de sélection de la fertilité [Mandonnet et al., 2005] a été proposé avec l'enregistrement de la précocité de la naissance via celui du jour de mise bas dans un système d'élevage identique à celui de Gardel (conduite en bandes, regroupement des chaleurs avec l'effet mâle et le sevrage à jour fixe). L'introduction dans un schéma de sélection du caprin Créole, de ce critère moyennement héritable ($0,25 \pm 0,05$) et présentant un coefficient de variation génétique très élevé (16,2%), est préconisé car une naissance précoce intra période de mise bas, améliore la productivité pondérale des mères au sevrage.

La prolificité (considérée comme un caractère de la chèvre) a une héritabilité faible ($0,14 \pm 0,05$) et conforme à la gamme de variation généralement rapportée pour ce caractère dans d'autres races [Menendez-Buxadera et al., 2003 ; 2004]. Considéré comme un caractère des chevreaux et de leur mère, la taille de portée permet alors d'exploiter plus de variabilité ($h^2=0,24 \pm 0,04$). Le poids des chevreaux à la naissance est héritable ($0,22 \pm 0,03$) ainsi que leur mortalité périnatale ($0,17 \pm 0,04$). La productivité numérique des mères qui est la résultante de ces critères pourrait donc être améliorée par sélection directe sur ces critères. Cependant, les corrélations génétiques défavorables entre taille de portée et poids naissance, taille de portée et mortalité périnatale indiquent qu'il faut rechercher un optimum en canalisant la taille de portée.

Les poids des chevreaux et leur croissance sous la mère sont des caractères sélectionnables dont l'héritabilité ($0,12$ à $0,26$) est dans la gamme des héritabilités rapportées en petits ruminants. Je poursuis l'analyse de ces caractères classiques de croissance sous la mère, en améliorant le modèle statistique (RRM) [Mandonnet et al., 2009 soumis]. Cette analyse de l'évolution des composantes génétiques du poids durant l'allaitement démontre que la valeur laitière (estimée par le gmq_{10-30}) et la croissance propre des chevreaux (estimé par le gmq_{30-70}) présentent des marges de progrès conséquentes. Du fait d'une sélection massale rigoureuse au domaine expérimental de Gardel, le poids à 70 jours des chevreaux a progressé génétiquement de 410 g en 13 ans (soit 5%). Il est à noter pour tous ces caractères de production avant sevrage, que des effets génétiques maternels défavorablement corrélés aux effets directs viendront freiner l'amélioration génétique qui pourra être mise en place.

La sélection sur les poids des chevreaux en post-sevrage est possible au pâturage sans complémentation ($h^2=0,14$ à $0,24$), ainsi que pour leur croissance sur la période 90-300 jours d'âge ($h^2=0,13$). Nos estimations d'héritabilité dans deux études [Mandonnet et al., 2001 ; Mandonnet et al., 2002] ne sont pas du même ordre de grandeur car réalisées avec des ensembles de données et des modèles différents. L'estimation de la variabilité génétique du poids en post sevrage est en cours avec un modèle de régression aléatoire qui fiabilise nos estimations sans changer les conclusions (Figure 7).

Une base de données est en cours de constitution en collaboration avec G.Alexandre pour l'estimation de la variabilité génétique de caractères de carcasse et de qualité de la viande de caprin Créole. Dans un premier temps, nous voulons déterminer des critères correspondant à ces caractères et les âge/poids optimum d'abattage en fonction du mode de conduite [Alexandre, Arquet et al., 2009 ; Alexandre, Liméa et al., 2009 ; Liméa et al., 2009].

2.3. ETUDIER LE DETERMINISME GENETIQUE ET LES MECANISMES DE RESISTANCE AUX STRONGLES

De nombreuses connaissances ont déjà été accumulées sur les gènes et mécanismes de résistance aux strongles chez les ovins. Ainsi, 11 pays à travers le monde ont orienté leurs travaux vers la détection de QTL (Quantitative Trait Loci) de résistance aux strongles gastro-intestinaux chez les ovins (de la Chevrotière, 2007). Cela a donné lieu à 17 publications. Les résultats publiés à ce jour mettent en évidence cinq régions chromosomiques où sont codés des gènes impliqués dans le système immunitaire qui auraient un rôle dans la mise en place d'une résistance aux parasites. De même, la réponse immune des ovins vis-à-vis des strongles est bien décrite [Bambou et al., 2008]. Leur résistance génétique induit la prolifération de mastocytes, de globules blancs et éosinophiles dans la muqueuse gastro-intestinale. Cette réponse produit des immunoglobulines A, G1 et E spécifiques. Malgré tout, les hypothèses restent nombreuses quant à l'enchaînement des mécanismes et l'identification du mécanisme dominant, décisif dans cette chaîne.

Les travaux sur les mécanismes de résistance aux strongles des caprins et les gènes qui les contrôlent, en revanche, sont rares. Ces travaux chez la chèvre Créole ont débuté en 2000 en s'appuyant à nouveau sur le troupeau expérimental du Domaine INRA de Gardel. Ils sont le support d'un travail de thèse (Claudia de la Chevrotière 2008-2010/UAG) et d'un travail post-doctoral depuis 2006 (Jean-Christophe Bambou). Ils sont inclus pour partie dans le programme européen REX EADGENE (EU contract N°. FOOD-CT-2004-506416).

2.3.1. INTÉRÊTS DU MODÈLE DE LA CHÈVRE CRÉOLE

La chèvre Créole comme toutes les populations animales introduites aux Amériques pendant la colonisation, est le fruit de nombreux métissages, de la sélection naturelle à laquelle elle a été soumise et d'une exploitation à des fins multiples (travail, viande, lait). Cette genèse lui a conféré des caractéristiques d'adaptation originales, comparativement à des races spécialisées élevées dans un milieu moins contraignant (Verrier et al., 2005). Nous faisons donc l'hypothèse qu'elle a engrangé des combinaisons d'allèles favorables au maintien de l'espèce dans un milieu à fortes contraintes climatiques et sanitaires.

Par ailleurs, la coévolution entre la chèvre et les strongles a été brève comparativement à l'ovin, car la chèvre a naturellement un régime alimentaire arbustif qui la tient relativement hors d'atteinte des strongles gastro-intestinaux. L'intensification de la production caprine a modifié son régime alimentaire en la rendant strictement brouteuse. Ses mécanismes de résistance vis-à-vis des strongles sont donc probablement plus primaires que chez le mouton chez qui ils ont eu le

temps de se complexifier. Le modèle caprin apporterait ainsi des informations complémentaires qui aideront à comprendre l'enchaînement des mécanismes en ovin.

2.3.2. DETECTER DES GENES DE RESISTANCE

Déterminisme polygénique ou monogénique ? Lors des nombreuses études de la variabilité génétique de la résistance aux SGI chez les ovins, l'hypothèse a toujours été faite d'un déterminisme polygénique « classique ». Seule une publication (Albers et al., 1987) avait fait l'hypothèse de l'existence d'un gène majeur⁴ (2 écart-types phénotypiques) chez un bélier Mérinos (Golden Ram) mais l'analyse de sa descendance n'avait pas confirmé cette hypothèse (Woolaston et al., 1990). En 1991, j'ai participé au développement d'un programme en langage FORTRAN d'analyse de ségrégation pour déterminer s'il existait, ou non, un gène majeur sur la taille de portée des truies de race Meishan en valorisant un dispositif de croisement. J'ai appliqué cette méthodologie au caractère de résistance aux SGI intra-population (Coll. P.Leroy, INRA-Rennes). Nous avons ainsi mis en évidence un gène majeur chez la chèvre Créole avec dominance partielle sur l'excrétion d'œufs [Mandonnet et al., 2004]. L'effet du gène augmente de 2,9 à 5,02 écart-types phénotypiques entre 7 et 11 mois (Figure 8). L'allèle récessif est associé à une résistance accrue avec un effet pléiotropique défavorable sur l'anémie et le poids. La nature de cette relation reste à élucider car elle est inverse à celle mise en évidence dans le cas d'une transmission polygénique du caractère. Cependant, elle est cohérente avec la fréquence nulle du génotype homozygote résistant parmi les boucs reproducteurs, le poids à 1 an étant le principal critère de choix des mâles pour le renouvellement. Ces résultats ont été obtenus par une approche « Maximum de Vraisemblance » utilisant un algorithme de Quasi-Newton. La localisation de ce gène devait être précisée par les analyses moléculaires. Ainsi, les familles où ce gène est en ségrégation sont privilégiées pour la recherche de QTL.

Localisation chromosomique de gènes importants, QTL, dans le contrôle de la résistance aux SGI.

Nous avons choisi une stratégie de *genome scan*⁵ dans un dispositif outbred, profitant de la structure familiale du troupeau de l'INRA Gardel et des phénotypages réalisés en routine sur les chevreaux en post-sevrage. Nous nous sommes appuyés pour cela sur la démarche des équipes les plus actives dans la recherche de QTL de résistance aux strongles (en Australie, Nouvelle-Zélande ainsi qu'au Royaume-Uni) où la majorité des études s'appuie sur des populations expérimentales. Dans certains cas, des populations divergentes pour la résistance ont été créées et croisées entre elles pour s'approcher d'un protocole optimal inbred. Plus de la moitié ont utilisé une stratégie par gène candidat⁶, mais les études récentes tendent à utiliser surtout le *genome scan* plus puissant et faisant moins d'hypothèses préalables.

Nous avons collaboré pour leur analyse avec C.Moreno (INRA-SAGA) et S.Bishop (Roslin Institute). Les résultats de la primo détection sont actuellement disponibles (12 familles, 380

⁴ Gène ayant un effet majeur sur un caractère, expliquant au moins 2 écart-types phénotypiques de la variance de ce caractère.

⁵ Analyse du génome entier d'un individu contre un ensemble de marqueurs dont la position sur le chromosome est bien connue.

⁶ Approche qui consiste à supposer l'implication d'un gène dans un quelconque effet *a priori* et à confirmer cette implication *a posteriori*.

descendants, 104 marqueurs microsatellites) [de la Chevrotière et al., 2009] et en cours de publication.

Des QTL associés à la résistance des caprins Créoles ont été identifiés sur les chromosomes 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 21, 22 et 26 (Tableau 2). Les QTL des chromosomes 8, 22, et 26 associés à l'éosinophilie à 7 mois, à l'excrétion d'œufs à 7 mois et à l'excrétion d'œufs à 11 mois respectivement sont significatifs au seuil chromosomique de 1 %. A notre connaissance, les QTL détectés sur les chromosomes 7, 8 et 14 sont les premiers rapportés sur le critère d'éosinophilie. Les deux QTL associés à l'excrétion d'œufs sont situés sur les chromosomes 22 et 26 mais seul le premier QTL est situé sur un chromosome où des QTL ont également été découverts chez le chromosome homologue (OAR19) ovin. En effet, le QTL détecté sur le chromosome 26, homologue au chromosome 22 ovin, pourrait être spécifique à la chèvre Créole. Cette piste originale mériterait d'être approfondie.

L'un des résultats les plus intéressants concernent le QTL situé sur le chromosome 5 caprin. De nombreux QTLs ont été détectés sur le chromosome équivalent en ovin (OAR3) sur le critère d'OPG et certains étaient situés dans la région du gène de l'interféron gamma, un gène impliqué dans les réponses immunitaires face aux parasites (Coltman *et al.*, 2001; Sayers *et al.*, 2005). Ces résultats suggèrent qu'un polymorphisme au gène de l'interféron gamma induirait une résistance aux strongles gastro-intestinaux en inhibant l'expression ou l'efficacité de la cytokine, ce qui favoriserait une réponse immune de type Th2 et tous les mécanismes immunitaires adjacents responsables de la résistance. Chez la chèvre, le gène de l'interféron gamma est situé sur le bras 5q23 du chromosome 5. Le marqueur (BMC1009) serait positionné après la zone où se situe le gène de l'interféron gamma, ce qui rendrait possible une certaine proximité du QTL détecté avec ce gène (Shibler *et al.*, 1998). Il est nécessaire d'augmenter la puissance de détection du dispositif afin de confirmer et d'obtenir une localisation plus précise de ce QTL. La proximité avec le gène interféron gamma apporterait une première indication que les mécanismes immunitaires mis en place chez le mouton et la chèvre contre les parasites gastro-intestinaux ont des points communs. Une analyse de réseaux de gènes pourra compléter ces données avant publication (Collaboration B.Bed'hom, INRA-GABI).

Il est à noter que nous ne confirmons pas dans cette recherche de QTL l'existence du gène majeur mis en évidence statistiquement. Plusieurs explications peuvent être avancées :

- Le gène se situe sur l'un des chromosomes qui n'a pas été couvert par le *genome scan* (chromosomes 25, 27, 28).
- Le gène majeur détecté est en fait la somme de plusieurs gènes d'effet moins important.
- L'échantillonnage des 380 individus du *genome scan* n'est pas représentatif de la variabilité du troupeau de Gardel.

Nous avons pu écarter cette troisième hypothèse. L'explication est probablement une combinaison des deux premières. La poursuite de ce travail nous éclairera sur ce point.

2.3.3. COMPRENDRE LES MECANISMES DE RESISTANCE

La défense des organismes contre les parasites fait appel à des mécanismes d'immunité cellulaire et humorale. A notre connaissance, le travail entrepris avec J.C. Bambou sur les mécanismes de résistance de la chèvre Créole est unique en caprin. Il a débuté par une série de mises au point expérimentales du modèle pour le rendre reproductible. Nous en sommes à la phase d'élaboration et de vérification des premières hypothèses.

Standardisation du modèle d'étude. La réalité de l'infestation des chevreaux au pâturage est complexe (variations du niveau d'infestation, de la proportion entre espèces de strongles, interaction avec d'autres pathogènes, niveaux de stress alimentaire, climatique variables...). Une première étape a consisté en un long travail de standardisation de l'infestation afin de déterminer la dose de larves infestantes d' *H. contortus* optimale pour reproduire la maladie en conditions expérimentales et exprimer la résistance, sans « déborder » les défenses des animaux. La dose unique choisie de 10 000 L3 a induit un pic d'éosinophilie à 5 jours et une anémie à partir de 21 jours caractéristiques de la réponse à l'infestation par *H. contortus*. Il a été retenu de travailler avec des chevreaux mâles d'environ 8 mois alimentés au foin complétés avec 100g de concentré /jour correspondant aux besoins stricts des animaux à cet âge. Dans un premier temps nous avons travaillé avec des chevreaux préalablement infestés au pâturage.

Validation du modèle « caprins Créoles résistants/sensibles aux strongles » déterminé à partir des index des chevreaux estimés pour leur excrétion d'œufs à 11 mois. Le phénotype des animaux infestés expérimentalement a été comparé à leur génotype estimé au pâturage lors des différents protocoles mis en place. Il apparaît que pour une distance d'environ 1 écart-type génétique d'index, les animaux sensibles ont excrété de 8 à 20 fois plus d'œufs de strongles en fin d'infestation que les animaux résistants et ont développé une anémie plus marquée dans l'ensemble (Figure 9). Les conclusions auxquelles nous aboutirons avec notre modèle standardisé garderont donc une certaine pertinence vis-à-vis du modèle d'infestation naturelle.

Premiers mécanismes. L'étude de la réponse immunitaire protectrice contre *H. contortus* chez des chevreaux de statut génétique résistant ou sensible est en cours.

La réponse humorale a été corrélée positivement avec le niveau d'infestation des animaux [Bambou et al., 2008]. Elle traduirait une réaction d'hypersensibilité, en relation plutôt avec la fertilité des vers femelles qu'avec le nombre de vers. C'est le contraire de ce qui est observé chez l'ovin où cette réponse humorale est rapportée comme protectrice vis-à-vis des strongles. Par ailleurs, aucune différence significative de cinétique et de niveaux des anticorps (IgG, IgA, IgE) spécifiques de *H. contortus* n'a été observée entre chevreaux résistants et sensibles. Ce résultat nous incite à mesurer la réponse humorale locale dans la muqueuse gastro-intestinale, lieu de la mise en place de la réponse immunitaire effectrice.

La réponse cellulaire semble aller dans le même sens que dans le modèle ovin. Il est mis en évidence une sensibilité des chèvres Créoles à *H. contortus* liée à une réponse immunitaire inappropriée [Bambou, Gonzales-Garcia et al., 2009]. En effet, les animaux sensibles activeraient de façon marquée leur population de lymphocytes CD8+ orientant ainsi leur réponse vers la voie Th1 (Figure 10). Quant aux chevreaux résistants, ils présentent une proportion circulante de

lymphocytes B significativement plus élevée que les sensibles, du début à la fin de l'infestation. Cette réponse est l'unique marque d'une activation de la voie Th2, plus adaptée *a priori* pour réagir à une invasion de parasites extracellulaires.

Dans l'ensemble les résultats dénotent le pouvoir de prédiction limité de la réponse circulante par rapport à la réponse locale. Des techniques d'analyses histopathologiques sont en cours de développement pour analyser plus finement la réaction immunitaire des chevreaux dans les muqueuses au contact direct avec le parasite (collaboration Bambou/Olivier UAG et Plateforme APEX de SA-INRA). Une plus grande disponibilité en nombre de chevreaux extrêmes permettra également l'étude de la réponse immunitaire cellulaire dans les ganglions qui drainent la muqueuse abomasale. Cette partie du programme de recherche va bénéficier également de chevreaux plus extrêmes génétiquement, issus de la sélection divergente sur l'index de résistance et élevés hors infestation. Deux lignées maintenues hors sol au domaine de Duclos, sont en cours de constitution depuis deux années. De plus, le choix pourra être orienté vers des animaux porteurs d'allèles de résistance ou de sensibilité, en valorisant les résultats des QTL quand les marqueurs seront densifiés.

COMPRENDRE L'ADAPTATION GENETIQUE DANS D'AUTRES ESPECES

Ma mission d'animation du groupe PGAS de l'URZ m'a amenée à collaborer avec mes collègues afin de mettre en place une démarche analytique dans le modèle « adaptation du porc à la chaleur » et caractériser l'adaptation du bovin Créole au pâturage.

3.1. ADAPTATION DU PORC LARGE-WHITE A LA CHALEUR

Comme dans le cas de la résistance aux SGI, la maîtrise des effets de la chaleur chez le porc est conçue en combinant un ensemble de moyens (aménagement de bâtiments, formulation alimentaire et sélection) [Renaudeau et al., 2004]. L'expérience que j'ai acquise sur les caractères de résistance aux maladies, m'a amenée à collaborer avec mon collègue JL Gourdine, dans l'orientation des protocoles et des méthodes d'analyses de **l'adaptation à la chaleur chez le porc** (modèles d'analyse de la variabilité génétique de la thermotolérance, gestion génétique du troupeau expérimental, réflexions actuelles sur la mise en place d'un protocole back cross de détection de QTL entre les races LW et Créoles et /ou RN+ et RN-).

En élevage porcin, la lactation est un point critique en terme de tolérance à la chaleur et de besoins nutritionnels. Dans une première approche, la variabilité génétique de la température rectale chez la truie en lactation a été déterminée ($h^2 = 0.25$) ; cette valeur varie en fonction du stade de lactation et de l'heure de mesure (07 :00 vs. 12 :00) [Gourdine et al., 2006] (Figure 11). Une augmentation de la base de données est nécessaire pour permettre de calculer avec une bonne précision les relations génétiques entre les paramètres d'adaptation et de production (ingestion, production laitière, perte de poids). Ces résultats très encourageants montrent qu'il semble possible de sélectionner des animaux avec de bonnes aptitudes à produire sous la contrainte thermique.

3.2. ADAPTATION DU BOVIN CREOLE AU PATURAGE

J'ai collaboré avec mon collègue M.Naves à la compréhension des performances des bovins en phase engraissement au pâturage à Gardel (Naves, 2003). La comparaison de bovins Créoles et de Bovins croisés Limousin x Créole sur leur adaptation aux effets directs du climat tropical au pâturage a permis la caractérisation de mécanismes d'adaptation du génotype Créole à son milieu et l'évaluation de l'intérêt du génotype croisé dans ce milieu contraignant (résistance à la chaleur, résistance aux tiques, résistance aux strongles).

L'adaptation des bovins Créoles au climat réside dans le fait qu'ils supportent des températures ambiantes plus élevées avant de mettre en action la régulation thermique (Naves, 2003). Leur

zone de confort thermique serait décalée de quelques degrés vers les températures supérieures par rapport au génotype croisé. De plus, leur régulation par évaporation cutanée et respiratoire est plus efficace pour maintenir la température interne stable. Ceci est couplé avec la faculté de baisser leur température interne aux heures les plus fraîches de la journée. Enfin, en période de stress thermique, ils réduisent la production de chaleur interne en se reposant plus et en décalant leur activité d'ingestion aux heures fraîches de la journée.

En comparaison, les bovins croisés Limousins sont moins efficaces pour maintenir stable leur température interne en période de stress thermique. L'inconfort apparaîtrait avec l'augmentation du taux d'humidité ambiante. Cependant, les variations de température interne restent minimales et ne modifient pas leur comportement alimentaire. Les bovins croisés maintiennent des temps d'ingestion supérieurs à ceux des Créoles, y compris pendant la journée, pour couvrir leurs besoins d'entretien et de production.

L'analyse de la sensibilité des bovins à **l'infestation par la tique *Amblyomma variegatum*** indique que les facteurs environnementaux ont un effet important (Naves, 2003). Cependant, une variabilité d'origine génétique significative a pu être estimée. Les comptages trimestriels semblent les plus fiables car moins influencés par la biologie de la tique. Ces résultats sont prometteurs quant à la possibilité de sélectionner les bovins Créoles sur leur résistance à *Amblyomma variegatum* en condition d'infestation. Par ailleurs, le bovin Créole est en contact avec *Amblyomma variegatum* depuis plus d'un siècle. La sélection naturelle et ses origines *Bos indicus* semblent lui avoir apporté une bonne résistance aux maladies associées, dont la dermatophilose de faible incidence également chez les zébus d'Afrique de l'Ouest élevés dans des zones endémiques (Barré et Woodman, 1990).

Concernant **l'infestation par les strongles gastro-intestinaux**, le niveau moyen d'infestation est très faible : Il a varié entre 0 et 395 opg (Naves, 2003). Les strongles ne constituent donc pas un stress important après le sevrage, contrairement à ce qui est rapporté par Aumont et al. (1991) avant le sevrage. L'immunité contre les strongles semble donc bien établie à partir de 9 mois. Plus le poids au sevrage est élevé moins les veaux sont infestés au cours de la période d'engraissement. Les Créoles et les croisés Limousins ont montré le même niveau d'infestation moyen.

L'existence d'une interaction génotype*environnement a été mise en évidence chez bovin Créole en phase d'engraissement au pâturage et à l'auge [Naves et al., 2009]. Ces analyses de l'évolution du poids vif ont été réalisées avec le même modèle de régression aléatoire que celui en cours d'application pour le poids vif des chevreaux en engraissement avec ou sans parasites.

CONCEVOIR DES SCHEMAS D'AMELIORATION GENETIQUE « PETITS RUMINANTS » DANS LES DFA

Dans les DFA, les attentes des éleveurs sont grandes vis-à-vis de l'INRA, concernant particulièrement les choix génétiques (local *vs* amélioré) et l'organisation de la sélection. Les connaissances et modèles développés en France métropolitaine ne sont pas transposables dans ces régions tropicales. Une réflexion spécifique doit être menée. Cette action fait partie du volet expertise au développement de mon activité.

4.1. CONCEVOIR UN SCHEMA DE SELECTION COMBINANT RESISTANCE ET PRODUCTION EN CAPRIN

Cette partie du programme de recherche a été contractualisée avec la Région Guadeloupe pour promouvoir le développement d'élevages alternatifs productifs, économes en intrants, respectueux de l'environnement et valorisant le terroir Guadeloupéen (CPERGD2000-2006).

4.1.1. REFLEXION SUR LA CREATION ET LA DIFFUSION DU PROGRES GENETIQUE EN PETITS RUMINANTS EN ZONE TROPICALE

Cette réflexion débutée en 2005 [Alexandre et Mandonnet, 2005], s'est poursuivie avec la participation à un séminaire FAO/INRA en juin 2009 sur le thème de « Animal genetic resources and their resistance/tolerance to diseases, with special focus on parasitic diseases in ruminants » et la participation en tant que papier invité du congrès annuel de la Fédération Européenne de Zootechnie 2009 sur « Selection in harsh environment : Strikes and strategies for what results ? ». Une synthèse sur ce thème est en cours de rédaction. Elle hiérarchise les différentes questions à se poser avant de mettre en place un schéma de sélection en milieu contraignant, en 3 niveaux de choix :

4.1.1.1. QUELS OBJECTIFS ET CRITERES DE SELECTION FAUT-IL RETENIR ?

Avec au moins 102 races locales⁷ recensées dans le monde, il existe une grande diversité caprine (Devendra et Burns, 1983; Lebbie et Ramsay, 1999). Cependant, leur caractérisation n'est généralement pas engagée en zone tropicale faute de moyens financiers suffisants (Galal et al., 2000). Cela traduit le fait que leur intérêt en terme d'adaptation au milieu n'est généralement pas compris par les éleveurs, ni même par les organismes de développement. La haute technicité (maîtrise de l'alimentation, de la reproduction, de la santé) requise pour l'élevage de races spécialisées exotiques n'est pas non plus bien appréhendée. Les éleveurs sont attirés par le format adulte de ces animaux et leur vitesse de croissance rapide. Pourtant, au regard de l'efficacité de production de viande, ces critères ne sont pas à privilégier, notamment dans un contexte d'accès

⁷ Génotypes autochtones non sélectionnés

restreint à la nourriture. En revanche, l'adaptation au stress est nettement supérieure dans les races locales (Baker et al., 1998 ; Silanikove, 2000) et mériterait d'être mieux valorisée.

La productivité des troupeaux allaitants est la résultante des qualités maternelles de la mère (fertilité, prolificité optimum, valeur laitière), de la survie et de la croissance des petits (Galal et al., 2000) [Menendez et al., 2003]. Les objectifs de sélection doivent être choisis parmi ces caractères, en fonction des qualités propres du génotype pour lequel on travaille. Les performances individuelles de croissance, de conformation et de qualité de viande sont à prendre en compte dans une deuxième étape car ils ont un impact moindre sur la productivité (Upton, 1985) et peuvent même être corrélés négativement avec la productivité (Mukasa-Mugerwa et al., 2002).

Dans ce contexte, l'amélioration génétique d'une population peut prendre en compte directement les critères d'adaptation au milieu (méthode analytique, [Mandonnet et al., 2001]) ou indirectement en sélectionnant sur les critères de production mesurés dans le milieu contraignant (méthode globale, Poivey, 1987). Il faut également considérer le milieu pour prendre en compte les interactions génotype*environnement qui sont fréquentes en milieu tropical car les conditions d'élevage sont contrastées [Menendez et Mandonnet, 2006] et peuvent freiner le progrès génétique.

4.1.1.2. VAUT-IL MIEUX OPTER POUR UNE STRATEGIE INTRA-RACE OU DU CROISEMENT?

Une fois les objectifs et critères de sélection définis, le progrès génétique peut être obtenu par sélection intra-race, croisement ou création d'une race synthétique. Le choix est guidé par l'héritabilité des caractères d'intérêt, et la complémentarité et la facilité de maintenir l'hétérosis entre les génotypes en croisement (Legal et Planchenault, 1993). Dans les environnements difficiles comme ceux rencontrés en zone tropicale, le croisement se heurte souvent aux difficultés d'adaptation, coût et difficultés d'entretien des reproducteurs spécialisées. Les échecs lors de l'introduction de races exotiques sont désormais nombreux à être rapportés (Boer, Anglo-Nubian, Saanen ; Griffin et Allonby, 1979 ; Suba et al. 2000). La voie de la race synthétique peut être choisie en combinant des génotypes ayant des caractéristiques intéressantes pour le système d'élevage local. Par exemple, la chèvre Dual Purpose du Kenya est issue du croisement sur plusieurs générations des génotypes locaux (Galla et Small East African) avec les génotypes importés Toggenburg et Anglo-nubien (Mwandotto et al., 1992). Cette option nécessite une bonne organisation collective des éleveurs. Le bénéfice est relativement rapide mais non garanti. Au vu des expériences rapportées, la décision devrait être prise, le plus souvent, d'utiliser et si possible d'améliorer la population animale indigène (Baker et Gray, 2004).

4.1.1.3. QUELLE ORGANISATION PRATIQUE ADOPTER POUR DIFFUSER LE PROGRES GENETIQUE ?

Une fois définis les objectifs de sélection et génotypes sur lesquels portera la sélection, il reste à mettre en place une organisation pour diffuser le progrès génétique créé dans les élevages. Trois niveaux d'organisation existent en fonction d'infrastructures et d'apports financiers croissants : les troupeaux élites, les troupeaux commerciaux, et les organisations régionales ou nationales. Le troupeau élite est l'option la plus flexible mais le progrès génétique y est lent en raison d'une base

de sélection réduite. Les éleveurs privés, membres du schéma génétique et enregistrant les performances de leurs animaux, contribuent au schéma en apportant leurs meilleures femelles et reçoivent en retour des boucs améliorateurs. Les éleveurs de moindre niveau technique peuvent se porter acquéreurs de boucs améliorateurs. Par ailleurs, cette organisation peut fonctionner de manière indépendante ou s'associer à une coopérative pour obtenir des approvisionnements à moindre coût et trouver des débouchés pour la production. Les élevages commerciaux, le plus souvent organisés en grandes unités productivistes en zones périurbaines (Lebbie et Ramsay, 1999), ont pour vocation à réaliser des gains financiers en vendant du progrès génétique généré par l'utilisation de ressources exotiques en race pure ou synthétique, ou en croisement. Dans ce secteur, on classe les associations d'éleveurs comme, par exemple, la « Boer Goat Breeding Society ». Le progrès génétique que l'éleveur achète n'est pas garanti car il peut être soumis à interaction avec le milieu d'élevage (ce qui est fréquent en zone tropicale) si son niveau technique diffère de celui de l'élevage de sélection. Enfin, Au niveau national avec l'appui d'instituts, des programmes de sélection efficaces sont organisés (Galal et al., 2000), [Naves et al., 2000] mais les infrastructures et les financements nécessaires à ce genre d'organisation font le plus souvent défaut en zone tropicale.

Le meilleur compromis entre investissements financiers, infrastructures et progrès génétique attendu est le troupeau élite (Peacock, 1996). C'est la solution la plus durable dans les environnements difficiles, bien qu'elle se heurte souvent aux attentes à court terme des professionnels et à leur préjugé défavorable à l'égard des génotypes locaux. Un facteur important à prendre en considération est alors le nombre de mâles et de femelles qui détermine l'intensité de sélection applicable et la consanguinité dans le troupeau (Falconer, 1989 ; Kinghorn, 1995). Baker et Gray (2004) avancent les chiffres minima de 150 mères accouplées à 5 mâles pour au plus 3 ou 4 reproductions. Ponzoni (1992) recommande un troupeau élite fermé d'au moins 500 femelles et 7 nouveaux pères par an.

L'analyse des nombreuses, mais souvent infructueuses, expériences de sélection mises en place dans la zone tropicale conduit à mettre en avant « le troupeau élite » comme meilleur compromis entre investissements financiers, infrastructures et progrès génétique attendu. Quatre points déterminants pour la durabilité de tels schémas ressortent de notre analyse : une *composante sociale* avec l'intégration précoce au programme des éleveurs et de leurs souhaits, particulièrement en zone tropicale et en production caprine où les habitudes culturelles, religieuses et sociales sont fortes; une *composante biologique* avec l'exploitation de l'adaptation des populations animales locales ; une *composante technique* avec la stricte nécessité de recueillir des données de performances et de pedigree rigoureuses malgré les conditions difficiles (innovations techniques astucieuses) ; et enfin une *composante économique* avec l'identification d'un marché, d'une demande permettant aux éleveurs de vivre de leur production. Cette réflexion guide ma contribution à la mise en place d'un schéma d'amélioration génétique en Caprin Créole.

4.1.2. DESCRIPTION DES SYSTEMES D'ELEVAGE ET ATTENTE DES ELEVEURS EN GUADELOUPE ET EN MARTINIQUE

Les systèmes de production des caprins Créoles en Guadeloupe et les choix de sélection des éleveurs sont décrits [Jaquot et al., 2009]. Ce sont des élevages de petite taille avec un niveau moyen d'intrant. Les éleveurs, pluriactifs en majorité, possèdent en moyenne 7,4 ha de terre pour

31 chèvres-mères et un total de 60 caprins. Un faible nombre travaille uniquement en Créole (4%). La plupart d'entre eux (67%) possèdent à la fois des animaux Créoles et des croisés. Un tiers (34%) élèvent seulement des croisés. Les croisements résultent essentiellement d'accouplements incontrôlés entre chèvres Créoles et reproducteurs importés, tels que Boer, Anglo-Nubien, Alpine ou Saanen. Les éleveurs apprécient la rusticité et la résistance de la chèvre Créole mais considèrent sa croissance comme trop lente (Tableau 3). Les critères pour le renouvellement des boucs sont dans 77% des réponses la conformation et la croissance. Ces critères sont aussi importants pour les femelles (30% des réponses). Cependant, une attention particulière est portée aux qualités maternelles (comportement maternel 23%, reproduction 20%, production de lait 17%). La résistance aux maladies n'apparaît pas comme un critère important (respectivement 10% et 7% des réponses pour les mâles et les femelles). Un travail de communication et de formation auprès des éleveurs reste à entreprendre sur ce thème [Alexandre et al., 2008]. Une typologie nous a permis, avec l'encadrement professionnel, de repérer les éleveurs potentiellement intéressés et de valeur, à inclure dans la base de sélection (Tableau 4).

En Martinique, la description des systèmes d'élevage est très similaire à celle de la Guadeloupe [Alexandre, Leimbacher et al., 2009]. Il y a une bonne marge de progrès dans la conduite des élevages. Les critères de sélection sont à nouveau le développement et la conformation. La base de sélection serait plutôt croisée anglo-nubien que Créole. Il semble trop tard pour entreprendre un programme de développement en se basant sur le génotype Créole.

4.1.3. ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS CAPRINS EN GUADELOUPE

Mon activité de recherche va de pair avec une action d'encadrement des filières des petits ruminants dans les DFA. Cette activité a été développée ces deux dernières années par la rédaction d'un document technique de synthèse à l'attention des professionnels et de l'encadrement du développement en Guadeloupe sur « Les apports de la SRZ pour l'amélioration génétique des caprins Créoles en Guadeloupe » (Alexandre G., Mandonnet N., Naves M., Archimède H.). Ce document fait des propositions en termes d'organisation de la sélection des caprins viande en Guadeloupe et l'implication de l'INRA et de son troupeau dans le schéma.

Depuis début 2008, j'anime un groupe de 3 techniciens et ingénieur (INRA, EDE et CABRICOOP) avec lequel j'ai programmé 3 étapes de travail validées par les professionnels locaux de Guadeloupe. Nous avons défini le standard de la race caprine Créole et mis au point la grille de notation de ce standard. C'est **la première étape**. Les animaux sont notés sur 100 points (ramenés à une note sur 10) avec 12 critères (6 correspondants à des caractères de race⁸ et 6 correspondant à des caractères fonctionnels⁹) pondérés par 1 ou 2 selon l'importance accordée. Les caractères de développement et de conformation n'ont pas été inclus dans un premier temps. Il reste à formaliser les règles d'inscription au registre de la race et le mode de gestion de ce registre. Une quinzaine de notateurs a été formée à l'utilisation de cette grille, en avril dernier. Les tournées de marquage ont débuté mi-2009 après le retour de l'enquête menée par l'URZ sur un échantillonnage des élevages caprins de Guadeloupe. L'objectif est de constituer une population base de sélection la plus vaste possible (d'environ 300 mères) afin de permettre une sélection ultérieure efficace et de maîtriser la consanguinité dans le schéma. Le principe retenu est dans un premier temps d'éliminer les animaux ayant un phénotype croisé prononcé (avec Boer, Saanen, Anglonubien...).

⁸ Profil, port d'oreille, couleur et longueur du pelage, cornes, gabarit

⁹ Couleur des muqueuses, couleur des onglons, aplombs avant et arrière, ligne de dos, défauts testicules ou mamelles

La seconde étape concerne la mise en place du contrôle de performances avec la méthodologie d'estimation des poids âge-type et la paramétrisation proposée par l'URZ [Naves et al., 2005]. Le circuit des données sera organisé par l'EDE et l'IE. Le passage du technicien EDE dans les élevages sera facilité par une programmation des naissances ad'hoc ce qui implique l'adoption d'une conduite en bandes grâce à l'encadrement de la coopérative caprine. Le démarrage du contrôle de performances est prévu début 2010. Il faudra environ une année pour décider quels élevages font ou non partie de la base de sélection suivant la rigueur dans l'enregistrement des performances.

Dans la troisième étape, les objectifs de sélection, leur pondération dans un index synthétique et le schéma de sélection (création et diffusion du progrès génétique) seront définis par les professionnels aux vues des propositions de l'URZ, du retour de l'enquête d'opinion. L'adaptation générale des chevreaux au milieu sera prise en compte via l'enregistrement des performances dans le milieu d'élevage contraint. Pour ce qui est de la résistance aux SGI (pathologie majeure qui peut remettre en cause l'élevage), il sera proposé aux professionnels d'inclure son évaluation génétique lors du regroupement des jeunes en centre d'élevage (possiblement au Domaine de Gardel) en appliquant le protocole décrit précédemment (2.2.1.4.). L'ensemble de ce programme de développement sera **validé par la création d'un organisme de sélection** (une émanation de la coopérative CABRICOOP) conforme à la réglementation de la nouvelle loi sur l'élevage.

Le programme de sélection du caprin Créole est aussi prévu pour démarrer fin 2010. L'URZ soutient et accompagne la politique des professionnels caprins. Cependant, si pour diverses raisons (trop grande labilité des élevages, aides publiques allant à l'encontre du caprin Créole, difficulté de mise en place du contrôle de performances...), les objectifs précédents ne pouvaient être atteints, nos travaux de sélection seraient appliqués au troupeau de Gardel (construction de l'index de sélection synthétique) et le progrès génétique serait diffusé grâce à une organisation en troupeau élite. Ce progrès serait créé dans le troupeau de Gardel et diffusé dans des élevages multiplicateurs par la vente de reproducteurs améliorateurs. Des boucs venant de l'extérieur pourraient être testés sur descendance à Gardel.

Afin de formaliser et de généraliser mon action auprès des professionnels caprins, j'ai initié un travail de thèse sur « l'optimisation des schémas de sélection de petits ruminants en milieu tropical » (Mélanie Jaquot, AgroParis Tech, 2009-2011) coencadré par F.Phocas (INRA-GABI). Des éléments théoriques seront fournis pour construire l'objectif de sélection, dimensionner le schéma. Cette activité d'accompagnement de la profession agricole répond aux missions de l'URZ. Elle constitue par ailleurs un lieu d'application et de validation des résultats de la recherche et fait naître de nouvelles questions de recherche.

4.2. APPUI AU SCHEMA OVIN MARTINIK

Mon appui au schéma de sélection de l'Ovin Martinik s'est concrétisé par un programme de travail devant conduire à l'évaluation des résultats du schéma depuis 10 ans et l'optimisation de son fonctionnement. La restitution de la première tranche des résultats montrant le bon potentiel de production des ovins Martinik a soulevé un grand intérêt chez les éleveurs de la base de sélection [Mandonnet et al., 2005].

L'objectif de l'étude menée en 2004 (Antoine, 2004) était, à partir des enregistrements du contrôle de performances réalisé dans la base de sélection de l'USOM en Martinique, de décrire le potentiel de production du mouton Martinik et ses facteurs de variation. Les brebis et les béliers sont indexés sur leurs performances et celles de leurs descendants en ferme enregistrées dans le cadre du contrôle de performances (qualités maternelles et croissance sous la mère). Les meilleurs agneaux sont ensuite regroupés en centre d'élevage et évalués pendant 4 mois. Les 30% supérieurs sont diffusés dans les élevages de la base de sélection tandis que 45% sont vendus dans les élevages commerciaux et les 25% les moins bons sont envoyés à la boucherie.

Les résultats de 5835 mises bas ayant produit 9046 agneaux, issus de 150 béliers et 1992 brebis ont été analysés. En moyenne, la productivité numérique d'un troupeau de 50 brebis Martinik a été estimée à 52 agneaux par an, soit une productivité pondérale à 70 jours de 690kg/an. Le potentiel de production de l'ovin Martinik apparaît donc parmi les plus élevés des populations d'ovins à poils. Il résulte notamment d'un rythme de reproduction soutenu (3 mises bas en 2 ans), d'une bonne prolificité (151%) et d'un poids au sevrage supérieur à celui rapporté dans les autres populations. Les niveaux de productivité obtenus par les ovins OMK démontrent qu'une race locale élevée dans son milieu et soumise à un contrôle de performances rigoureux, se révèle économiquement compétitive.

Les estimations d'héritabilité de la valeur laitière des brebis (GMQ10-30) et du potentiel de croissance des agneaux en allaitement (GMQ30-70) montrent qu'il existe de la variabilité génétique disponible pour la sélection dans la population ovine Martinik. De plus, le produit local possède un créneau de commercialisation bien identifié (qualité de la viande, garanties sanitaires dues au mode d'élevage, à l'insularité et à la résistance des animaux). Il est recherché par le consommateur. Les professionnels du mouton Martinik sont fortement encouragés à poursuivre leurs efforts dans un esprit collectif. La mise en œuvre de la sélection s'est traduite par une augmentation phénotypique de la productivité numérique d'environ 1% par an, et de la productivité pondérale de 2% par an. Leurs résultats serviront ainsi de modèle pour l'agriculture caribéenne.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion des travaux réalisés depuis 14 ans à l'URZ, je tiens à souligner la richesse de l'environnement humain et scientifique dont j'ai bénéficié, et le soutien apporté par le Département de Génétique Animale à mon programme de recherche. L'essentiel de mon travail dans ce rapport a été de mettre en forme et en perspective, les fruits d'une action collective (post-doctorant, doctorantes, stagiaires, équipe Petits Ruminants de PTEA, cellule parastologie du laboratoire URZ, collègues chercheurs et service d'appui). Par ailleurs, des liens forts existent avec d'autres programmes de l'INRA (notamment, SAGA-Toulouse, ENV-Toulouse, GABI-Jouy en Josas) et des collaborations internationales (ILRI-Kénya, Roslin Institute-RU) sont nées de ce programme.

Au cours de ces années, ma production a été de trois ordres : des connaissances sur la résistance aux strongles des caprins et sa variabilité génétique, un modèle expérimental divergent support de nombreux développements possibles en physiologie et enfin, des reproducteurs caprins de valeur génétique connue. Ces contributions illustrent les différents apports de la génétique au projet scientifique et de développement d'une équipe pluridisciplinaire, comme l'est l'URZ.

Nous avons démontré que le caractère de résistance est sélectionnable et nous accompagnons les professionnels Guadeloupéens afin de l'inclure dans le schéma d'amélioration génétique du caprin Créole en construction. De nombreux travaux à l'URZ (Alexandre et al., 1997) ont démontré la haute productivité de ce génotype. Il est maintenant acquis que ses performances (reproduction, croissance) enregistrées au pâturage peuvent encore progresser génétiquement. Des travaux sont programmés pour évaluer également la marge de progrès génétique pour les performances d'abattage et de qualité de viande. Le programme d'amélioration génétique du caprin Créole et les différentes modalités de mise en œuvre auxquelles nous réfléchissons s'inscrivent dans une réflexion plus large de l'URZ sur la conception des schémas de sélection spécifiques pour la zone tropicale. Outre cet intérêt immédiat pour le développement des productions animales en zone tropicale, l'étude de la résistance génétique aux SGI chez les caprins va permettre des avancées dans la connaissance des gènes impliqués et des mécanismes contrôlés, transposable au modèle ovin et à la zone tempérée.

Les perspectives que je décris dans ce chapitre s'inscrivent dans le pas de temps du nouveau projet d'unité de l'URZ : 2009-2012. Elles ne me concernent pas uniquement. J'aurais besoin à nouveau de fédérer des compétences disciplinaires autour de ces projets. Plusieurs fronts sont ouverts pour la poursuite de ces travaux : sur l'intégration de l'adaptation dans les objectifs de sélection de petits ruminants en zone tropicale, sur l'identification de gènes et de mécanismes de résistance, sur la relation entre résistances à deux pathologies différentes, sur la régulation de l'allocation des ressources.

5.1. INTEGRER LA RESISTANCE AUX STRONGLES DANS LES OBJECTIFS DE SELECTION CHEZ LE CAPRIN CREOLE

L'analyse de la variabilité génétique des caractères de production et de résistance du caprin Créole sera close avec l'achèvement des deux thèses que je co-encadre. Le travail de M. Jaquot consiste à valoriser cette connaissance en intégrant la résistance dans un programme de sélection de caprins « viande ». Il s'appuie sur la population caprine Créole de Guadeloupe mais a vocation à être diffusé dans d'autres populations, des Caraïbes notamment. Quatre étapes sont programmées :

- Modéliser le fonctionnement d'un élevage guadeloupéen de caprins, afin de comprendre les critères zootechniques influant sur sa productivité, et leur importance relative, pour déterminer des pondérations économiques de l'objectif de sélection (calcul des équations de profit)
- Réfléchir à l'organisation du schéma de sélection (nombre d'animaux, taille de troupeaux, quels animaux au contrôle de performances...) et tester différents schémas possibles.
- Analyser la sensibilité des pondérations économiques et construire un index synthétique basé sur les différentes connaissances disponibles: variabilité génétique des performances, information QTL, pondérations économiques, enquête d'opinion.
- Simuler le progrès génétique attendu suivant différentes hypothèses de fonctionnement du schéma

5.2. IDENTIFIER LES GENES DE RESISTANCE AUX STRONGLES EN CAPRIN

Dans le cadre de la thèse de C. de la Chevrotière, le volet identification des gènes de résistance des caprins Créoles se poursuit. L'étape en cours consiste à densifier les marqueurs dans les zones chromosomiques ayant répondu à la cartographie par intervalle. La puissance de détection du dispositif devrait être augmentée par la prise en compte des liens de parentés entre familles et l'augmentation de la taille de certaines familles. Nous sommes également associés au développement d'une puce caprine SNP couvrant les régions où des QTL de résistance ont été détectés en caprin Créole (Projet Sustainable solutions for small ruminants- Appel d'offre FP7-KBBE-2009-3). L'objectif de cette recherche de QTL est de remonter jusqu'à la (aux) mutation(s) causale(s) afin de mieux comprendre les mécanismes de résistance et de proposer une cible vaccinale. En effet, l'utilisation d'un nombre restreint de gènes en sélection assistée par marqueurs pourrait faciliter l'adaptation des strongles à cette résistance de leur hôte et donc ne serait pas une voie pérenne d'application de nos résultats.

5.3. COMPRENDRE LES MECANISMES DE RESISTANCE AUX STRONGLES EN CAPRIN

L'étape suivante du travail post doctoral de J.C. Bambou est l'étude de la primo-réponse immunitaire protectrice contre *H. contortus* chez des chevreaux Créoles naïfs vis-à-vis des SGI réalisée début 2008. Les premiers résultats semblent indiquer un phénotype sensiblement identique entre résistants et sensibles en primo infestation et une excrétion 8 fois plus importante

des chevreaux sensibles en seconde infestation (Figure 5). Ce résultat traduit le fait que la résistance s'acquière après un contact répété avec le parasite et ce de façon différentielle entre résistants et sensibles.

Pour valoriser le matériel génétique disponible (lignées divergentes de caprins Créoles) et les connaissances acquises sur la variabilité du caractère, le projet nécessite un apport de nouvelles compétences au sein de l'équipe. Un profil de chargé de recherche a été rédigé en ce sens. Des techniques de génomique fonctionnelle seront à développer sur les tissus cibles des parasites (muqueuse gastrointestinale, ganglions mésentériques...). Des mesures complémentaires d'expression de gènes de cytokines, de chémokines et d'immunologie pourront être réalisées en parallèle. Les positions des gènes différenciellement exprimés seront comparées aux régions chromosomiques primolocalisées. Nous disposons pour ce faire de la plateforme en génomique hébergée par l'UMR INRA-CIRAD 1309 sur le Centre Antilles-Guyane. Ce programme pourra se développer ultérieurement sur les modèles cowdriose chez les caprins Créoles et dermatophilose chez les zébus Brahmans. Ce profil pourra contribuer au renforcement des collaborations INRA-CIRAD sur des modèles tropicaux d'intérêt, en coordonnant par exemple un réseau sur le thème «résistances génétiques aux pathologies animales tropicales».

5.4. COMPRENDRE LA RELATION GENETIQUE ENTRE LA RESISTANCE AUX STRONGLES ET CELLE A LA COWDRIOSE CHEZ LES CAPRINS

Ce travail sera poursuivi avec l'estimation de la corrélation génétique entre ces deux pathologies mettant en œuvre des voies de régulations des mécanismes immunitaires *a priori* différentes (Th1 pour Cowdriose et Th2 pour strongyloses). Très lourd d'un point de vue expérimental, ce protocole valorisera la divergence des chevreaux Créoles de l'INRA sur la résistance aux strongles afin de réduire les besoins en animaux. Ces travaux sont à la fois indispensables avant la diffusion de reproducteurs caprins résistants aux strongles et originaux car abordés par aucune équipe, à notre connaissance. Une recherche de marqueurs moléculaires de résistance à la cowdriose est également conduite dans ce protocole en collaboration avec l'Université de Bern (G.Obexer-Ruff, Inst Anim Genet Nutr & Housing), avec une démarche « gène candidat ».

5.5. COMPRENDRE LA REGULATION GENETIQUE DE L'ALLOCATION DES NUTRIMENTS ENTRE FONCTIONS VITALES ET DE PRODUCTION

Les besoins nutritionnels relatifs aux différentes fonctions des ruminants sont variables dans le temps et selon le stade physiologique des animaux. Les différentes voies métaboliques (lipolyse, lipogénèse..) sont « allumées » ou « éteintes » suivant le stade physiologique (Chilliard et al., 2000), l'environnement et les nutriments sont dirigés vers différents organes, fonctions de survie ou produits finaux. Jusqu'à présent, les travaux en ruminants ont échoué à prédire correctement l'orientation des nutriments du fait d'avoir considéré uniquement ces nutriments comme destinés aux fonctions homéorhétiques (liées à la survie de l'espèce : croissance, reproduction, lactation) et d'avoir négligé les régulations génétiques d'homéostasie (liées à la survie et au bien être de l'individu) (Friggens et Newbold, 2007).

La résistance aux strongles est l'une de ces fonctions d'homéostasie. La défense des organismes contre les parasites fait appel à des mécanismes d'immunité cellulaire et humorale. La mise en place de ces mécanismes et la réparation des tissus lésés par les parasites nécessitent des synthèses de protéines (anticorps, etc...) donc l'utilisation d'énergie et d'acides aminés, lesquels doivent être fournis par l'alimentation soit directement, soit par la mobilisation de réserves corporelles. Les mécanismes de défense contre les parasites viennent alors en compétition avec les besoins d'entretien et de production des animaux.

Notre objectif est d'améliorer l'efficacité des productions en comprenant mieux comment sont allouées les ressources alimentaires entre les multiples voies biologiques d'adaptation de l'animal à ces milieux contraignants. De nombreux résultats (Wilson, 2009) montrent que dans les populations animales locales utilisées à des fins multiples et ayant subi la sélection naturelle pendant plusieurs siècles, les priorités dans l'orientation des nutriments sont différentes de celles des races spécialisées. Nous arrivons à la même conclusion en observant la relation négative entre niveau de production laitière (estimé) et niveau d'infestation chez nos chèvres Créoles en lactation tandis que Chartier et Hoste (1997) rapportent une relation positive chez des chèvres Alpines sélectionnées pour la production de lait.

La première étape de cette étude nécessite d'étayer les hypothèses à l'aide d'un sujet post doctoral. La compréhension de la régulation des nutriments serait abordée dans le modèle caprin Créole, en considérant différents stades de production (mère en lactation, jeune en allaitement, jeune sevré). L'étude de l'interaction entre la densité nutritionnelle de la ration (haut vs bas, énergie et azote) et du niveau de sélection (résistant vs sensible aux strongles) inclurait des mesures d'ingestion, de digestion, d'utilisation métabolique des nutriments (viande, lait, dépôts,...), de zootechnie (croissance, lait, prolificité, survie), de carcasse, de biochimie de la viande, et de parasitologie. Ce projet valorise les lignées caprines résistante et sensible aux strongles et serait en lien avec les travaux sur les mécanismes de résistance. Il ouvrirait sur un programme de recherche à plus long terme sur la constitution d'un modèle petit ruminant mixte (lait/viande) et sur le contrôle génétique de l'allocation des ressources nutritionnelles.

REFERENCES CITEES

- Alexandre, G., Aumont, G., Fleury, J., Coppry, O., Mulciba, P., and Nepos, A. (1997). Semi-intensive production of meat goats in a tropical area - The case of Creole goats grazing on *Digitaria decumbens* in Guadeloupe. *Productions Animales* 10, 43-53.
- Albers G.A.A., Gray G.D., Piper L.R., Barker J.S.F., Le Jambre L.F., Barger I.A., 1987. The genetics of resistance and resilience to *Haemonchus contortus* infection in young Merino sheep. *Int J Parasitol*, 17, 1355-1363
- Ayalew W., Rischkowsky B., King J.M., Bruns E., 2003. *Agric. Sys.* 76: 1137–1156.
- Baker, R.L. (1997). Genetic resistance to helminths in small ruminants in Africa. *Productions Animales* 10, 99-110.
- Baker, R.L., and Audho, J.O., Aduda, E.O., and Thorpe, W. (2001). Genetic resistance to gastro-intestinal nematode parasites in Galla and Small East African goats in the sub-humid tropics. *Animal Science* 73, 61-70.
- Baker, R.L., and G.D.Gray, 2004. Appropriate breeds and breeding schemes for sheep and goats in the tropics. *Worm control for tropical Asia*. ACIAR Eds: R.A.Sani, G.D. Gray, R.L. Baker.272pp.
- Baker, R.L., Kassi, A.L., Rege, J.E.O., Reynolds, L., Bekele, T., Mukassa-Mugerwa, E., 1998. Resistance of Galla and small East African goats in the sub-humid tropics to gastrointestinal nematode infections and the peri-parturient rise in faecal egg counts. *Vet. Parasitol.* 79:53-64.
- Baker, R.L., Kassi, A.L., Rege, J.E.O., Reynolds, L., Bekele, T., Mukassa-Mugerwa, E., and Rey, B. 1992. A review of genetic resistance to endoparasites in small ruminants and an outline of ILCA's research programme in this area. 10th SR-CRSP. pp. 1-27.
- Baker, R.L., and Rege, J.E.O. 1994. Genetic resistance to diseases and other stresses in improvement of ruminant livestock in the tropics. 5th World Cong. Genet. Appl. To Livest. Prod., Guelph, Canada.
- Barré N., 1989. Biologie et écologie de la tique *Amblyomma variegatum* Acarina: Ixodina en Guadeloupe Antilles Françaises. Thèse Doctorat, Paris-Sud, 267 pp.
- Bath G.F., Malan F.S. et Van Wyk J.A., 1996. The "FAMACHA" ovine anaemia guide to assist with the control of haemonchosis. 7th annual congress of the livestock health and production group of the South African Veterinary Association, 152-156
- Besier R.B., 2005. Electronic sheep handling technology for targeted treatment of *Trichostrongylus* and *Ostertagia* in Australia 4th international workshop "Novel Approaches to the Control of Helminth Parasites of Livestock", 16
- Broughan J.M., Wall R. 2007. Faecal soiling and gastrointestinal helminth infection in lambs. *Int J Parasitol*, 37, 1255-1268
- Chandrawathani P., Jamnah O., Waller P.J., Høglund J., Larsen M. et Zahari W.M., 2002. Nematophagous fungi as a biological control agent for nematode parasites of small ruminants in Malaysia: a special emphasis on *Duddingtonia flagrans*. *Vet Res*, 33, 685-696
- Chartier, C., Hoste, H., 1997. Response to challenge infection with *Haemonchus contortus* and *Trichostrongylus colubriformis* in dairy goats. Differences between high and low producers. *Vet. Parasitol.* 73, 267–276.
- Chevrotière (de la) C. 2007. Caractérisation de marqueurs génétiques de résistance aux strongles gastro-intestinaux chez les caprins Créoles. Mémoire de maître ès sciences (M.Sc.), Faculté des sciences de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 120pp.
- Chilliard Y, Ferlay A, Mansbridge RM, et al. 2000. Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. Conference on Ruminant Nutrition and Human Health, Environment, nov. 1999 Paris, France, *Annales de Zootechnie* 49 (3) : 181-205
- Coltman, D.W., Wilson, K., Pilkington, J.G., Stear, M.J., and Pemberton, J.M. (2001). A microsatellite polymorphism in the gamma interferon gene is associated with resistance to gastrointestinal nematodes in a naturally parasitized population of Soay sheep. *Parasitology* 122, 571-582.

- d'Alexis S., Loranger-Merciris G., Mahieu M. et Boval M., 2009. Influence of earthworms on development of the free-living stages of gastrointestinal nematodes in goat faeces. *Vet Parasitol*, 163, 171-174
- Dayo, G.K., Thevenon, S., Berthier, D., Moazami-Goudarzi, K., Denis, C., Cuny, G., Eggen, A., and Gauthier, M. 2009. Detection of selection signatures within candidate regions underlying trypanotolerance in outbred cattle populations. *Molecular Ecology*, 18:1801-1813.
- Delgado, C., Rosegrant, M., Steinfeld, H., Ehui, S., and Courbois, C. 1999. *Livestock to 2020: The next food revolution* (Washington:International Food Policy Research Institute).
- Devendra C. and Burns M. 1983. *Goat production in the tropics*. Eds Commonwealth Agricultural Bureaux, London. 184pp.
- Falconer D.S. 1989. *Introduction to quantitative genetics*. Longham Scientific and Technical, UK.
- Friggens NC, Newbold JR. 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. Annual Meeting of the British Society of Animal Science, March 27-29, 2006 Univ York, York, England, *Animal* 1 (1): 87-97
- Galal, S., Boyazoglu, J., Hammond, K., 2000. Developing breeding strategies for lower input animal production environments. ICAR Technical Series No. 3, p. 570.
- Genin D. 2006. Croissance démographique : quels impacts sur le développement durable. <http://www.pro-environnement.com/publications/vertitude-magazine/> site consulté le 25 octobre 2007.
- GIEC "Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptations et Vulnerability, IPCC Working Group II, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Griffin L. and Allonby E.W. 1979. Trypanotolerance in breeds of sheep and goats with an experimental infection of *Trypanosoma congolense*. *Veterinary Parasitology*, 5:97-105.
- Hoch T., Pradel P. et Agabriel J., 2004. Modelling beef cattle growth: model evolution and applications. *INRA Prod Anim*, 17: 303-314.
- Kinghorn B.P. 1995. Methods of using genetic variation-a primer on selection, nucleus flocks and crossbreeding. In: Gray G.D., Woolaston R.R., Eaton B.T., ed, *Breeding for resistance to infectious diseases of small ruminants*. ACIAR Monograph N°34, Canberra, Australia, pp 291-308.
- Lebbie S.H.B. and Ramsay K. (1999) A perspective on conservation and management of small ruminant genetic resources in the sub-Saharan Africa. *Small Rum. Res.* 34:231-247.
- Le Gal O. and Planchenault D. (1993) Utilisation des races caprines exotiques dans les zones chaudes. Contraintes et intérêts. Eds Le Gal et Planchenault CIRAD-EMVT.
- Mahieu, M., Aumont, G., Michaux, Y., Alexandre, G., Archimede, H., Boval, M., and Theriez, M. (1997). Mixed grazing sheep/cattle on irrigated pastures in Martinique (FWI). *Productions Animales* 10, 55-65.
- Mandonnet N. 1995. Etude de la variabilité génétique de la résistance des petits ruminants aux strongles gastro-intestinaux. Recherche sur les critères et objectifs de sélection. In. These de doctorat de l'Université Paris XI. p.115
- Marie-Magdeleine C., Mahieu M., Philibert L., Despois P., Archimède H. 2009. Effect of cassava (*Manihot esculenta crantz*) foliage on nutrition, parasite infection and growth of lambs. *Small Ruminant Research (in press)*.
- McLeod, R.S. (1995). Costs of Major Parasites to the Australian Livestock Industries. *Int. J. Parasitol.* 25, 1363-1367.
- Mignon-Grasteau S., Boissy A., Bouix J., Faure JM., Fisher A.D., Hinch G.N., Jensen P., Le Neindre P., Mormède P., Prunet P., Vandeputte M. et Beaumont C., 2005. Genetics of adaptation and domestication in livestock. *Livest Anim Sci*, 93, 3-14
- Morand-Fehr P., Doreau M. 2001. Ingestion et digestion chez les ruminants soumis à un stress de chaleur. *INRA Productions Animales* 14(1), 15-27.
- Morton J, 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *PNAS*, 104, 19680-19685.
- Mukusa-Mugerwa E., Lahlou-Kassi A., Anindo D., Rege J.E.O., Tembely S., Markos Tibbo, Baker R.L. 2000. Between and within breed variation in lamb survival and risk factors associated with major causes of mortality in indigenous Horro and Menz sheep in Ethiopia. *Small Ruminant Research* 37, 1-12.

- Mwandotto B.A.J., Taylor J.F., Ravuna F., Ahuya C.O., Mkuu S. 1992. Current status of the Kenyan Dual-Purpose Goat breeding project at Naivasha. Proceedings of the 10th Scientific Workshop of the Small Ruminant Collaborative Research Support Programme (SR-CRSP), 26-27 february, 1992, ILRAD, Nairobi, Kenya, pp5-11.
- Naves M. 2003. Caracterisation et gestion d'une population bovine locale de la zone tropicale : le Bovin Creole de Guadeloupe. Thèse INA-PG, 283pp.
- Neurath, M. F., Finotto, S., and Glimcher, L. H. (2002) *Nature Medicine* **8**, 567-573
- Over, H.J., Jansen, J., Olm, P.W.v. (1992). Distribution and impact of helminth diseases of livestock in developing countries. FAO Anim. Prod. Health Pap. *96*, pp.221
- Patterson, D.M., Jackson F., Huntley J.F., Stevenson L.M., Jones D.G., Jackson E. Russel A.J.F. 1996. Studies on caprine responsiveness to nematodiasis: Segregation of male goats into responders and non-responders. *Int.J.for Parasitol.* *26*: 187-194.
- Peacock C. 1996. Improving goat production in the tropics- A manual for development workers. Eds. Farm-Africa and Oxfam (UK and Ireland).
- Poivey J.P. 1987. Development of breeding methods in the tropics with limited availability of in-the-field recording systems. *World Review of Animal Production*, *23*(1): 83-92.
- Ponzoni R.W. 1992. Genetic improvement of hair sheep in the tropics. FAO ANIMAL Production and Health Paper 101, FAO, Rome, 168pp.
- Sangster, N.C. 1999. Anthelmintic resistance: past, present and future. *Int. J. Parasitol.* *29*, 115-124.
- Sayers, G., Good, B., Hanrahan, J.P., Ryan, M., and Sweeney, T. (2005). Intron 1 of the interferon [gamma] gene: Its role in nematode resistance in Suffolk and Texel sheep breeds. *Res. Vet. Sci.* *79*, 191-196.
- Schibler, L., Vaiman, D., Oustry, A., Giraud-Delville, C., Cribiu, E.P. (1998). Comparative gene mapping a fine-scale survey of chromosome rearrangements between ruminants and humans. *Genome Res.* *8*, 901-915.
- Silanikove N. (2000) The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Rum. Res.* *35* : 181-193.
- Suba M.S., Reyes R.O., Gray G.D., Villar E.C. 2000. Identifying small ruminant genotypes that are resistant to endoparasites. *Proceeding of the Phillipine Society of Animal Science* *37*: 26-27.
- Upton M.1985. Returns from small ruminant production in South West Nigeria. *Agricultural Systems* *17*: 65-83.
- Van Wyk J.A., 2001. Refugia - overlooked as perhaps the most potent factor concerning the development of anthelmintic resistance *Onderstepoort J Vet Res*, *68*, 55-67
- Vercruysse J., Knox D.P., Schetters T.P.M. et Willadsen P., 2004. Veterinary parasitic vaccines: pitfalls and future directions. *Trends Parasitol*, *20*, 488-492
- Verrier E., Tixier Boichard M., Bernigaud R., Naves M. 2005. Conservation and value of local livestock breeds : usefulness of niche products and/or adaptation to specific environments. *Animal Genetic Resources Information*, *36*: 21-31
- Wilson P.N. 1998. Adaptation of livestock to tropical environments. In *Agriculture in the Tropics* by Webster, C.C. and Wilson, P.N.(Eds), 371-390 pp.
- Wilson R.T., 2009. Fit for purpose – the right animal in the right place. *Trop Anim Health Prod* *41*:1081–1090
- Woolaston R.R., Gray G.D., Albers G.A.A., Piper L.R., Barker J.S.F. 1990. Analysis for a major gene affecting parasite resistance in sheep. *Proceedings of the 4th WCGALP*, *15*: 131-134.
- Woolaston R.R., Singh R., Tabunakawai N. le Jambre L.F., Banks D.J.D., Barger I.A. 1992. Genetic and environmental influences on worm egg counts in the humid tropics. *Proceedings of the Australian Association of Animal Breeding and Genetics* *10*: 147-150.