

L'expertise pour prédire la production cotonnière en Afrique de l'Ouest : est-elle une solution face aux aléas climatiques émergents ?

Abdoulaye Ndour ⁽¹⁾, Pascal Clouvel ^(2,3), Éric Goze ^(2,3), Pierre Martin ^(2,3),
Louise Leroux ^(4,3,5), Abdoulaye Dieng ⁽⁶⁾, Romain Loison ^(7,3,8)

⁽¹⁾ SODEFITEX. Boulevard du Centenaire de la Commune de Dakar, km 4,5. BP 3216. Dakar, Sénégal.

⁽²⁾ CIRAD, UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France.

⁽³⁾ AIDA, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

⁽⁴⁾ CIRAD, UPR AIDA, Dakar, Sénégal.

⁽⁵⁾ CSE. Rue Léon Gontran Damas, Fann Résidence. BP 15532. Dakar, Sénégal.

⁽⁶⁾ Université de Thiès. ENSA. BP A 296. Thiès, Sénégal.

⁽⁷⁾ CIRAD, UPR AIDA, Tambacounda, Sénégal. E-mail : romain.loison@cirad.fr

⁽⁸⁾ ISRA. CRA-Tambacounda, Quartier Liberté. BP211. Tambacounda, Sénégal.

Reçu le 29 janvier 2018, accepté le 24 octobre 2018, mis en ligne le 22 novembre 2018.

Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)

Description du sujet. Face aux effets attendus des aléas climatiques sur l'économie des pays d'Afrique de l'Ouest, anticiper la production agricole est devenu une priorité pour les acteurs du développement. L'article porte sur l'estimation précoce de la production cotonnière avant la récolte au Sénégal, par voie d'expertise de la SODEFITEX.

Objectifs. L'étude a pour objectifs d'explicitier les connaissances mobilisées par les experts pour prédire le rendement, eu égard à l'incertitude sur les conditions climatiques à venir, et d'évaluer la performance des prévisions, selon le niveau territorial considéré.

Méthode. Pour atteindre ces deux objectifs, l'article s'appuie sur l'analyse statistique de la production cotonnière au Sénégal de 2004 à 2015, combinée à une enquête réalisée auprès de 32 experts de la SODEFITEX.

Résultats. L'analyse des résultats d'enquête met en évidence une prévision principalement établie sur la base de l'état des cultures, des pratiques culturales au premier rang desquelles la date de semis et, pour certains experts, de l'historique de la production et son environnement organisationnel et social. La comparaison des prévisions avec la production effective montre que les experts surestiment systématiquement les niveaux de production inférieurs à 1 000 kg·ha⁻¹, en conditions climatiques défavorables.

Conclusions. Dans un contexte de faible documentation scientifique sur l'estimation précoce de la production par voie d'expertise, les résultats de l'étude éclairent sur les connaissances mobilisées et la performance des prévisions délivrées, ouvrant ainsi la voie à une critique rationnelle de l'expertise. La diversité de points de vue mise en évidence par l'analyse multicritère, entre niveaux hiérarchiques et entre agents de même niveau, souligne le besoin de confrontation des connaissances pour faire émerger les variables explicatives nécessaires à la prévision et tendre vers une objectivité accrue de l'expertise face aux aléas climatiques récurrents.

Mots-clés. Coton, prévision de rendement, niveau territorial, Sénégal.

Expertise for forecasting cotton production in Western Africa: a solution to emerging climate uncertainty?

Description of the subject. Climate uncertainty is expected to have a severe impact on the economy of West African countries. The use of forecasting in agricultural production has become a priority for those working in the field of development. This article focuses on the early prediction of cotton production levels before harvesting in Senegal, using expertise from the cotton development company, SODEFITEX.

Objectives. This paper aims to analyze the knowledge employed to predict yield, given the uncertainty about future climate conditions, and to evaluate the quality of such predictions, depending on the territorial scale of the expertise considered.

Method. The methodology used in this study was a statistical analysis of cotton production in Senegal between 2004 and 2015, combined with a survey of 32 SODEFITEX experts.

Results. Analysis of the survey of experts revealed that their evaluation of the cotton production was based mainly on the state of the crops and on crop management, with the planting date being the priority. For some experts, the history of production and its organizational and social environments were also important factors. A comparison of forecasts with actual production showed that the experts had systematically overestimated the levels of production when actual yields were below 1,000 kg-ha⁻¹, under adverse climatic conditions.

Conclusions. Within a context of poor scientific documentation of the early estimation of production by experts, the results of the study shed light on the knowledge drawn upon and the performance of the forecasts delivered, thus paving the way for a rational criticism of the expertise employed. The diversity of points of view highlighted by the multi-criteria analysis, between hierarchical levels and between agents at the same level, underlines the need for a closer look at the knowledge being utilized, in order to bring out «what matters» in these forecasts and to move towards greater objectivity of expertise in the face of recurrent climate hazards.

Keywords. Cotton, yield forecasting, territorial scale of expertise, Senegal.

1. INTRODUCTION

Face aux effets attendus des aléas climatiques sur l'économie et la santé humaine des pays d'Afrique de l'Ouest, anticiper la production agricole est devenu une priorité pour les politiques publiques et de sécurité alimentaire (Dury et al., 2010 ; Krueger et al., 2012). L'estimation précoce du niveau de la production agricole avant la récolte représente donc un enjeu majeur pour de nombreux acteurs du développement local, les états et les organisations internationales, et ceci alors que le changement climatique (CC) en rend l'exercice plus difficile (Doukpolo, 2014). En Afrique de l'Ouest notamment, le CC se traduit par une forte irrégularité spatiale et temporelle de la pluviosité, et l'augmentation de l'occurrence d'évènements pluvieux extrêmes (Sagna et al., 2015 ; Taylor et al., 2017), d'autant plus dommageables que la plupart des productions se font en condition pluviale stricte (Hulme, 1992 ; Sultan & Gaetani, 2016). Pour les filières vivrières informelles et les systèmes d'alerte précoce (SAP), l'estimation des superficies cultivées représente un défi. Pour les filières industrielles par contre, dont l'ensemble des parcelles cultivées fait l'objet d'un recensement exhaustif, c'est principalement l'estimation du rendement moyen à venir qui concentre l'attention des services agricoles. Plusieurs méthodes existent pour parvenir à cette estimation. Elles reposent sur :

- des observations de terrain telles les composantes du rendement (Maner et al., 1971 ; Worley et al., 1974) ;
- des analyses d'images par voie de télédétection (Leroux et al., 2016) ;
- la simulation de la croissance des cultures à l'aide de logiciels dédiés tels SARRA-H pour le sorgho ou COTONS pour le coton (Ndour et al., 2006 ; Mishra et al., 2008) ;
- le couplage de ces méthodes, à l'exemple de l'assimilation de données observées en cours de cycle de culture pour affiner la prévision des modèles de

simulation *op. cit.* (Launay & Guerif, 2005 ; Leroux et al., 2016).

Quelle que soit la technologie employée, ces méthodes sont limitées par la représentativité des données et leur disponibilité temporelle et spatiale, à l'exemple de la pluviosité, relevée ponctuellement et extrapolée localement dans les simulations (Hoogenboom, 2000). En outre, la forte hétérogénéité paysagère, le développement quasi-synchronisé de la végétation naturelle et cultivée, ou encore la forte nébulosité rendent difficile l'usage des outils de télédétection (Vancutsem et al., 2013 ; Leroux et al., 2014). Dans le cadre de l'estimation précoce de la production, ces méthodes sont enfin limitées par l'incertitude sur les conditions de milieu à venir, inconnues au moment de la prévision. Or, les conditions climatiques (Moussa et al., 2003) et phytosanitaires (Deguine et al., 1998) de fin de cycle déterminent une part importante du rendement au travers du nombre de fruits qui pourront arriver à maturité et de leur remplissage, ainsi que la qualité de la production (Ndour et al., 2017).

Une solution alternative à ces méthodes biophysiques est le recours à l'expertise. En Afrique subsaharienne, les SAP reposent en grande partie sur l'expertise. Au Burkina Faso, par exemple, la production céréalière est estimée au mois de septembre sur la base d'enquêtes auprès des producteurs et d'après l'état de développement des cultures (INSD, 2017). Le recours à l'expertise est toutefois régulièrement questionné du fait de la marge d'erreur des estimations et du manque d'objectivité des prévisions sous la pression politique locale (Tefft et al., 2007 ; Krueger et al., 2012). Des auteurs comme Popper (1972) et Longino (1990) considèrent que la connaissance, appliquée de façon plus générale à l'objectivité dans le domaine scientifique, est une construction sociale dépendante du contexte de sa production. En conséquence de quoi, tout résultat nécessite d'être vérifiable et l'objet d'une

critique rationnelle. Face à ce questionnement, peu de littérature existe sur l'expertise et les connaissances mobilisées par les experts pour prédire la production agricole et en faire une critique rationnelle.

Au Sénégal, une estimation de la production cotonnière est réalisée chaque année par voie d'expertise dès la fin septembre, soit deux mois avant la récolte, en vue de programmer la logistique de commercialisation du coton-graine dans les 15 secteurs de production du bassin cotonnier. Dans l'organisation pyramidale de la Société de Développement et des Fibres Textiles du Sénégal (SODEFITEX), chaque expert estime le rendement moyen du territoire dont il est responsable. Quatre estimations du rendement moyen sont ainsi produites par secteur, au niveau du groupement de producteurs (village) et du centre de production par compilation des expertises individuelles produites respectivement par les Relais Techniques (RT), les Conseillers Techniques (CT), ainsi qu'au niveau de secteur par les Chefs de Secteur (CS) et les Responsables Régionaux (RR). Un mois plus tard, en octobre, une autre estimation de la production est réalisée par mesure des composantes du rendement sur un échantillon représentatif de parcelles d'agriculteurs. Alors que la production effective est mesurée au niveau des usines d'égrenage, un tel dispositif offre l'opportunité rare d'évaluer la performance des prévisions produites selon la méthode et le niveau territorial considéré. Il permet également de questionner les connaissances mobilisées dans un contexte de CC marqué par une forte variabilité annuelle et spatiale de pluviosité sur tout le bassin de production depuis 1999 (Sagna et al., 2015).

Compte tenu de la diversité des points de vue sur le déroulement de la campagne agricole selon le poste occupé, ce travail repose sur l'hypothèse que

l'expertise s'appuie sur des connaissances différentes selon le niveau hiérarchique de l'expert au sein de l'entreprise. Sous réserve que ces connaissances soient explicites, les objectifs de cet article sont :

- d'expliciter les connaissances mobilisées pour prédire le rendement, eu égard à l'incertitude sur les conditions climatiques passées et à venir,
- d'évaluer la performance des prévisions, selon le niveau organisationnel considéré.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. La production cotonnière au Sénégal

Contexte agronomique. Au sud du pays, le bassin de production, qui correspond environ au tiers de la superficie du Sénégal, recouvre trois zones agro-climatiques plus ou moins favorables à la culture cotonnière avec un gradient de pluviosité nord-sud de 700 à 1200 mm (**Figure 1**). La contribution des zones humide, médiane et sèche à la production totale de coton-graine se situe respectivement à hauteur de 60, 30 et 10 %, pour une production totale variant de 25000 à 50000 tonnes de coton-graine (Ndour et al., 2017), selon les années. Sur le plan technique, ce zonage agro-climatique s'accompagne de recommandations techniques distinctes auprès des producteurs en rapport avec le potentiel de production locale de respectivement 1000, 1300 et 1500 kg·ha⁻¹ en zones sèche, médiane et humide. Sur le plan génétique, plusieurs variétés de cotonnier à floraison indéterminée ont été cultivées sur la période d'étude de 2004 à 2015. Ces variétés diffèrent sensiblement sur le plan de la qualité des fibres produites mais ni sur celui de la productivité en coton-graine, ni sur celui de

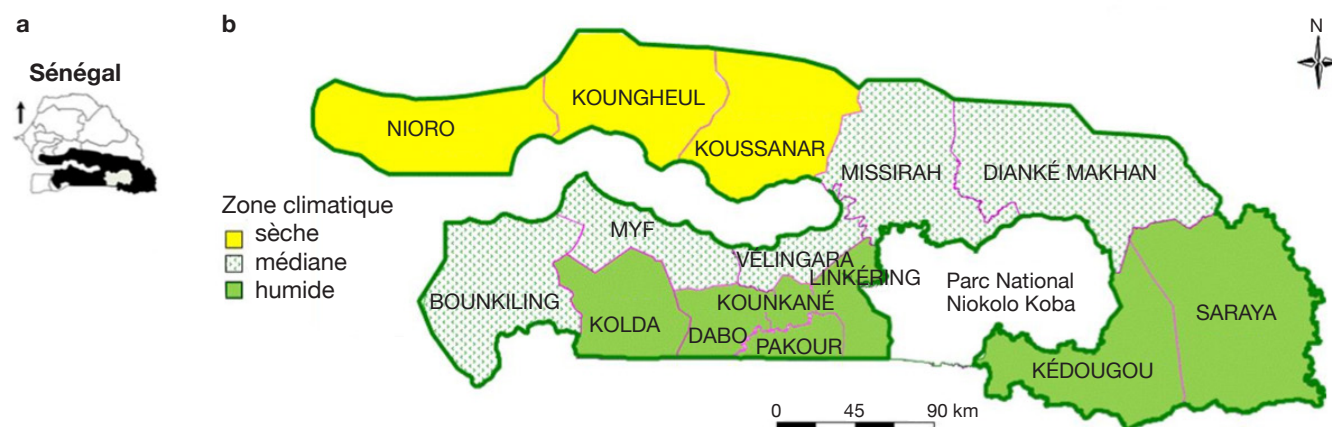


Figure 1. Bassin de production cotonnière au Sénégal (a) et localisation des secteurs de production par zone agro-climatique dans le bassin de production cotonnière de la SODEFITEX (b) (adapté de Ndour et al., 2017) — Cotton production area in Senegal (a) and agro-climatic zones of the SODEFITEX cotton production area (b) (adapted from Ndour et al., 2017).

la réponse au vécu hydrique (Ndour et al., 2017). Sur base des données de Ndour et al. (2017), nous pouvons considérer que l'effet pariétal n'influencera pas la qualité des prévisions de rendement.

Avec des valeurs moyennes de 668, 960 et 991 kg·ha⁻¹ sur la période d'étude respectivement en zones sèche, médiane et humide, les moyennes de rendements enregistrés sont globalement en cohérence avec la distinction des zones agro-climatiques. Une importante variabilité interannuelle est observée, quelle que soit la zone ou le secteur considéré (**Tableau 1**). Les rendements moyens les plus bas ont été observés en 2015 sur 11 des 15 secteurs du bassin de production, les plus élevés en 2005 et 2006. En zone humide, les secteurs de Kédougou et Saraya affichent leurs plus bas rendements en 2013 et non en 2015, comme pour le reste du bassin de production.

Contexte organisationnel. Le bassin cotonnier est organisé en quatre régions de production, chacune subdivisée en secteurs. La région de Kédougou se situe en zone humide, les autres régions recouvrent deux zones climatiques distinctes. Chaque secteur comporte plusieurs centres, chacun regroupant plusieurs villages dans lesquels les agriculteurs sont organisés en groupements de producteurs (**Figure 1** et **tableau 2**). Sur le plan de l'encadrement technique, le CS est rattaché hiérarchiquement au RR. Les centres sont

sous la responsabilité des CT en charge de plusieurs groupements de producteurs. Chaque groupement de producteurs, enfin, dispose d'un RT, lui-même producteur, qui assure l'interface du groupement avec la SODEFITEX. Le **tableau 3** présente les fonctions dévolues à chaque niveau hiérarchique.

Recueil des données. La production au niveau du secteur est calculée comme le produit entre le rendement moyen estimé et la superficie cultivée. La superficie cultivée est évaluée par le RT au niveau du groupement de producteurs et calculée comme la somme des superficies unitaires des différents groupements aux différents niveaux du centre, du secteur et de la région.

Chaque niveau d'encadrement fournit une estimation précoce du rendement moyen en coton-graine relatif au territoire dont il a la charge. Dans ce processus, quatre estimations sont produites annuellement par secteur, qui reposent sur une vision personnelle directe du rendement moyen par le CS et le RR, et sur la somme arithmétique des prévisions délivrées par les CT et les RT.

Outre les estimations produites par expertise, l'estimation par voie de mesure des composantes du rendement (ou comptage dans la suite du document) porte sur le nombre de capsules saines présentes sur les cotonniers en octobre, supposées contribuer à la production de coton-graine. La mesure est effectuée

Tableau 1. Variabilité spatiale et temporelle du rendement moyen en coton-graine réalisé par secteur de production dans le bassin de production sénégalais de 2004 à 2015 — *Spatial and temporal variability of average seed cotton yield by production sector in Senegal from 2004 to 2015.*

Zone	Secteur	Rendement minimum		Rendement maximum		Rendement moyen	Écart-type
		kg·ha ⁻¹	Année	kg·ha ⁻¹	Année		
Sèche	Nioro	259	2014	1013	2006	660	223
	Koungheul	356	2015	926	2006	585	152
	Koussanar	533	2015	1091	2006	760	164
Médiane	Missirah	630	2015	1272	2005	975	170
	Dianké Makhan	800	2015	1315	2005	920	151
	Vélingara	634	2015	1264	2006	920	157
	Boukiling	399	2013	1187	2005	715	173
	Médina Yéro Foula	461	2015	1167	2006	769	201
Humide	Linkering	707	2015	1389	2005	1091	198
	Pakour	762	2015	1283	2006	1003	228
	Koukané	561	2015	1297	2006	922	214
	Dabo	617	2015	1312	2006	882	218
	Kolda	574	2015	1190	2005	804	275
	Saraya	807	2013	1329	2005	1062	146
	Kédougou	958	2013	1450	2005	1170	136

Tableau 2. Découpage territorial opérationnel de la SODEFITEX pour l'encadrement de la production cotonnière au Sénégal en 2013 et 2016 — *Operational territorial breakdown of SODEFITEX for the management of cotton production in Senegal in 2013 and 2016.*

Région	Secteur	Centre (nombre)		Groupement de producteurs (nombre)	
		2013	2016	2013	2016
Tamba/Kahone	Nioro	2	0	28	0
	Koungheul	6	4	158	119
	Koussanar	7	5	192	157
	Missirah	12	9	255	236
	Dianké Makhan	5	4	97	97
Vélingara	Linkering	7	7	203	196
	Pakour	5	8	138	170
	Koungané	4	4	122	158
	Vélingara	6	5	175	191
Kolda	Dabo	8	8	217	250
	Kolda	6	4	144	142
	Boukiling	3	1	47	17
	Médina Yéro Foula	6	6	149	149
Kédougou	Kédougou	7	5	103	104
	Saraya	5	5	55	54

par le CT sur un échantillon représentatif de parcelles, à raison d'une placette de 100 m² par unité de surface piquetée et cultivée de 50 x 50 m, appelée corde. L'agrégation des données au niveau du secteur fournit un nombre moyen de capsules saines par hectare (NC). La composante de poids moyen capsulaire (PMC) est estimée chaque année par chaque CS à la lumière des PMC mesurés au cours des 10 dernières années. Le rendement estimé est alors calculé comme le produit de NC et PMC.

2.2. Connaissances mobilisées pour l'expertise

Cadre théorique et nature des savoirs. En matière de connaissances à l'œuvre au sein des entreprises, Grundstein (1994) distingue :

- les savoirs de l'entreprise, formalisés sous forme de procédures, de données, ou encore de règles ;
- les savoir-faire individuels et collectifs acquis par l'expérience de nature généralement informelle et tacite.

Dans le cas de la SODEFITEX, les savoirs formalisés sont résumés dans le **tableau 3** (source : SODEFITEX). La fonction exercée amène en outre l'expert à développer des savoir-faire techniques propres ou fondés sur les relations entretenues avec les agriculteurs, les autorités religieuses, coutumières et administratives. La veille menée par chaque expert

permet enfin de suivre l'activité des organisations concurrentes et leurs projets agricoles sur les différents territoires, à l'exemple des ONG, entreprises privées ou agences de l'État.

Modalités de l'enquête commune. Le questionnaire a été élaboré par un groupe de travail mixte et indépendant composé de huit chercheurs et experts de niveaux hiérarchiques différents, les membres de ce groupe de travail ne participent pas à l'enquête. À l'issue d'une discussion sur les déterminants de la production, 34 critères ont été retenus *a priori*, répartis dans les catégories « Facteurs climatiques », « Opérations culturelles », « Observations de terrain » et « Autres connaissances », et redevables des savoirs de l'entreprise ou du savoir-faire des experts (**Tableau 4**). Chaque critère alimente l'hypothèse sous-jacente d'une approche :

- circonscrite à la production cotonnière en cours (A),
- relative à l'histoire de la production (B) ou
- élargie à l'environnement écologique, social et culturel de la production sur le territoire considéré (C).

Pour accéder aux connaissances mobilisées dans la pratique, le questionnaire a été soumis entre novembre 2015 et février 2016 à 32 experts des régions de Vélingara et Tamba/Kahone, à raison de 3 RR (2 en activité et 1 hors cadre), 4 CS, 10 CT choisis au hasard

Tableau 3. Synthèse des connaissances formalisées de la SODEFITEX selon le niveau hiérarchique de l'expert dans la structure et les fonctions qui lui sont dévolues — *Synthesis of the formalized knowledge of SODEFITEX, according to the hierarchical level of the expert in the structure and the functions assigned to him.*

Niveau hiérarchique	Fonctions	Connaissances formalisées
Relais technique (RT)	<ul style="list-style-type: none"> - délimitation des parcelles - gestion des intrants et du crédit agricole - messages techniques - suivi de la culture - recensement des pratiques culturales 	<ul style="list-style-type: none"> - carnets de gestion (typologie des exploitations, superficies, utilisation des intrants) et du crédit agricole - fiches techniques (langues vernaculaires) - manuel de reconnaissance et de contrôle des bioagresseurs - manuels d'entretien et réparation des équipements agricoles
Conseiller technique (CT)	<ul style="list-style-type: none"> - organisation et suivi de la production agricole - organisation de chantiers : réparation du matériel agricole, traitements phytosanitaires, etc. - formation des RT et des producteurs - gestion des intrants (réception + stocks) et du crédit agricole 	<ul style="list-style-type: none"> - fiches de suivi de campagne - relevés pluviométriques - carnets de situation du crédit et des stocks - base de données informatisée de statistiques agricoles
Chef de secteur (CS)	<ul style="list-style-type: none"> - définition du plan de campagne agricole et logistique - organisation, suivi et supervision des activités agricoles et logistiques - suivi du programme de recherche et développement et de production de semences - relations avec les autorités administratives et religieuses locales 	<ul style="list-style-type: none"> - procédures d'observation des parasites, - base de données producteurs et statistiques agricoles - protocoles d'essais et procédures de certification des semences - rapports mensuels/déroulement de la campagne et la gestion des intrants
Responsable régional (RR)	<ul style="list-style-type: none"> - gestion administrative et financière de la Région - traitement des statistiques agricoles - supervision des programmes de recherche et développement et de production de semences - relations avec les autorités administratives, - pilotage des Processus Achat coton-graine et conseil agricole 	<ul style="list-style-type: none"> - procédures administratives, budgétaires et comptables - planning de commercialisation du coton-graine - documents de management opérationnel et qualité sécurité environnement

avec au moins 2 CT par secteur, 15 RT choisis au hasard avec au moins 1 RT par secteur. Les secteurs retenus sont ceux de Linkering en zone agro-climatique humide, de Vélingara et Missirah en zone médiane, et de Dianké Makhan en zone sèche.

Dans un premier temps, l'enquêté précise si l'expert tient compte ou non de la catégorie de critères proposée. Par catégorie, il lui est alors demandé s'il tient compte ou non de chaque critère listé, noté 0 ou 1, et s'il a recours à d'autres critères dans l'exercice de l'expertise. Il lui est demandé ensuite de hiérarchiser ces critères au sein de la catégorie et enfin d'attribuer une note aux facteurs retenus (ou score), comprise entre 1 et 20. Le questionnaire est accessible sur internet (Ndour, 2015).

Traitement des données. L'interprétation des données repose sur l'analyse des critères partagés *a posteriori* par rapport aux critères avancés *a priori* et leur hiérarchisation. Afin de visualiser le poids relatif de ces critères selon la fonction de l'expert, des graphes radars ont été construits sur la base de la moyenne arithmétique des scores enregistrés.

Pour accéder à la spécificité de hiérarchisation des critères selon la fonction de l'expert, une analyse multicritère a été effectuée en utilisant le logiciel Visual PROMETHEE (Mareschal & De Smet, 2009). Ce logiciel classe les experts selon le score attribué aux différents critères et permet de visualiser les résultats de l'analyse sous la forme d'un graphe. La méthode de classification est un algorithme issu de la recherche opérationnelle, qui :

Tableau 4. Critères d'estimation du rendement moyen proposés dans le questionnaire d'enquête — *Criteria proposed in the survey questionnaire for estimating the average performance.*

Rubrique	Savoirs de l'entreprise	Savoir-faire de l'expert	Approche
Facteurs climatiques	Allure de la pluviosité, ensoleillement Historique climat	Période, <i>vent</i>	A
			B
		Ruissellement, <i>inondation</i> , remontée des eaux	C
Opérations culturales	Travail du sol, date de semis, sarclage, traitement phytosanitaire, fertilisation minérale	<i>Fertilisation organique</i>	C
			A
Observations	Nombre de capsules par plant, nombre de fleurs par plant, densité, développement, dégâts de bioagresseurs, enherbement Type de sol	<i>Homogénéité du couvert</i>	A
		<i>Précédent cultural</i>	B
		<i>Localisation du champ</i> , <i>autres cultures, végétation naturelle, relief</i>	C
Autres connaissances	Qualité des intrants, période de mise en place Profil du producteur		A
		Historique de la production	B
		Avis du producteur, autre <i>avis, divination</i>	C

Les 34 critères retenus *a priori* sont répartis selon l'approche sous-tendue avec A = plante, B = plante x historique, C = holistique, et la nature des savoirs mobilisés dans l'estimation de la production selon qu'ils appartiennent aux savoirs de l'entreprise ou au savoir-faire de l'agent. Les critères non-retenus par les experts *a posteriori* sont en italique — *The 34 criteria retained a priori are distributed according to the underlying approach with A = plant, B = plant x historical, and C = holistic, and the nature of the knowledge mobilized for the estimation of the production according to whether it belongs to the company's knowledge or to the agent's expertise. The criteria not retained by the experts a posteriori are in italics.*

- calcule, pour chaque paire d'experts, la combinaison linéaire des différences de valeur entre les critères,
- utilise ces différences de valeur entre paires d'experts pour classer l'ensemble des experts.

2.3. Évaluation des méthodes d'estimation du rendement

Les données. L'analyse porte sur les campagnes agricoles de 2004 à 2015 dans les 15 secteurs du bassin de production. Elle a pour objet d'évaluer la méthode d'estimation par comptage ou l'expertise selon les quatre modalités décrites plus haut et désignées Expert/RT, Expert/CT, Expert/CS et Expert/RR dans la suite du document. La superficie cultivée est une donnée supposée connue sans erreur et la variable estimée est donc le rendement moyen du secteur en coton-graine-ha⁻¹. En prérequis nécessaires à l'emploi d'un modèle linéaire pour les calculs statistiques, on fait également l'hypothèse que :

- le rendement effectif, ou mesure, obtenu par pesée au niveau des usines d'égrenage, est connu avec une erreur d'importance négligeable par rapport à celle des estimations,

- toutes les prévisions de rendement délivrées sont indépendantes les unes des autres.

Traitement des données. La variable considérée dans l'analyse est l'erreur de prévision, calculée comme la différence entre la valeur obtenue par estimation et la valeur du rendement mesuré. Une fois connus la méthode de prévision, l'année de la campagne agricole et le secteur, la distribution des erreurs de prévision est supposée gaussienne, mais son espérance (*i.e.* le biais de prévision) et sa variance sont supposées dépendre de la méthode d'estimation, de l'année et du secteur. En outre, le biais est supposé dépendre linéairement du rendement à prédire, avec une pente différente suivant les méthodes.

Le modèle de l'erreur de prévision s'écrit alors :

$$Y_{ijk} = m + b_j + c_k + d_k x_{ijk} + (bc)_{jk} \quad (\text{Éq. 1.1})$$

$$+ A_i + (Ab)_{ij} + (Ac)_{ik} + E_{ijk} \quad (\text{Éq. 1.2})$$

avec i , l'année ; j , le secteur ; k , la méthode ; x_{ijk} , le rendement à prédire ; Y_{ijk} , l'erreur de prévision et E_{ijk} , l'erreur résiduelle.

La première ligne de ce modèle contient les effets fixes (Éq. 1.1), qui se répètent d'une année à l'autre, à savoir le biais moyen (m), les effets moyens du secteur (b_j) et de la méthode (c_k), ainsi que la pente de la dépendance linéaire entre l'erreur de prévision et le rendement à prédire. La deuxième ligne contient les variations aléatoires, imprévisibles, de ces effets d'une année (A_i) à l'autre (Éq. 1.2).

Dans le modèle, l'année, le secteur et la méthode ont également un effet sur la variance de l'erreur résiduelle (E_{ijk}), considéré comme additif sur le logarithme de la variance, indiquant que les effets de ces facteurs sur la variance sont multiplicatifs (Éq. 2).

$$\text{Log}(\text{Var}(E_{ijk})) = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k \quad (\text{Éq. 2})$$

De façon à tenir compte de son contexte spatial, le secteur est considéré comme appartenant à une zone agro-climatique. L'effet « secteur » sur l'espérance comme sur la variance de l'erreur de prévision a ainsi été hiérarchisé en « zones agro-climatiques » et « secteur dans les zones agro-climatiques ». L'analyse statistique a été réalisée au moyen de la procédure MIXED du logiciel SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

3. RÉSULTATS

3.1. Connaissances mobilisées pour l'expertise

Critères retenus *a posteriori* et hiérarchisation. Sur les 34 critères proposés dans l'enquête, 23 sont partagés par plus de la moitié des experts enquêtés. Cette liste comprend l'intégralité des 18 critères correspondant à des savoirs de l'entreprise, auxquels s'ajoutent 5 critères relevant du savoir-faire des experts (Tableau 4). Les savoir-faire avancés *a priori* par le groupe de travail mixte, mais non partagés par les experts portent sur :

- « l'homogénéité du couvert végétal » en tant qu'indicateur des problèmes d'installation de la culture (sécheresse, etc.) ayant contraint l'agriculteur à ressemer partiellement son champ,
- l'impact d'évènements climatiques extrêmes (vent, inondation, remontée des eaux),
- les décisions stratégiques du producteur (fertilisation organique et précédent cultural au niveau du champ cultivé, et localisation des champs sur l'exploitation et le territoire villageois selon leur fertilité),
- l'environnement paysager de la culture (autres cultures, végétation naturelle),
- le recours à des savoirs traditionnels sur la saison de culture (divination).

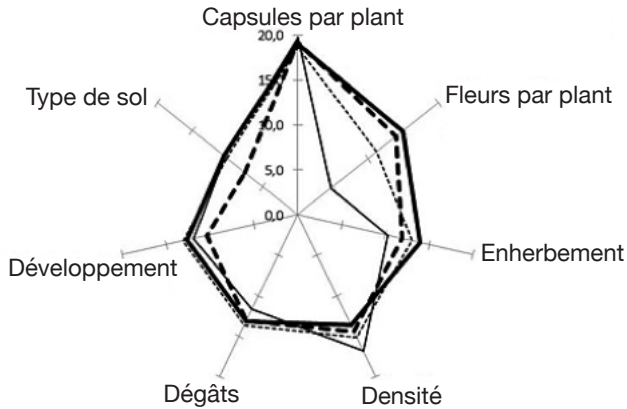
Proposés comme « autres critères » par certains experts, l'observation de la « taille des capsules » et la pratique de « démariage des plantules » ne sont pas partagées, de même que la « superficie cultivée » en tant qu'indicateur de l'intérêt des agriculteurs pour le coton par rapport aux activités concurrentes au sein de l'exploitation. L'exclusion de ces critères suggère une appréhension du système observé circonscrit à la seule culture cotonnière selon tout ou partie des approches A, B et C avancées *a priori* dans l'étude.

Parmi les critères retenus, les experts, toutes fonctions confondues, attribuent les scores les plus élevés aux critères d'observation de la culture et aux pratiques culturales, les facteurs climatiques et les « autres connaissances » obtenant des scores inférieurs (Figure 2). En référence au point de vue des CT, les critères considérés dans la rubrique « observation » (Figure 2a) portent principalement sur la culture elle-même (nombre de capsules et de fleurs par plant, développement de la culture, et densité de plants-ha⁻¹), ainsi que sur la pression de bioagresseurs (enherbement et dégâts d'insectes). Les critères retenus en matière de « pratiques culturales » (Figure 2b) correspondent aux opérations répertoriées dans les suivis de campagne par l'encadrement (Tableau 3), avec un poids particulier attribué à la date de semis, en perspective du calage de la culture par rapport à la durée de la saison des pluies, tout retard dans l'installation de la culture pouvant être sanctionné par un arrêt précoce des pluies.

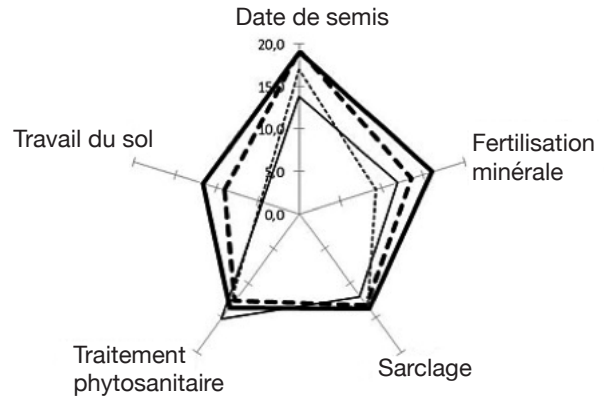
Concernant la rubrique « facteurs climatiques » (Figure 2c), il est intéressant de constater le poids attribué à la « période des pluies », savoir-faire largement partagé, qui désigne ici le moment d'occurrence des pluies au cours de la journée. Une pluie nocturne a peu d'effet sur l'ensoleillement, critère en seconde position dans la rubrique, et surtout ne gêne pas la réalisation des interventions culturales au premier rang desquels le sarclage, comme le ferait une pluie dans la journée. L'importance particulière attribuée à « l'historique du climat » par les RR suggère un raisonnement permettant de relier l'aspect conjoncturel de « l'allure de la pluviosité » de la campagne en cours à l'aspect structurel du climat local (approche B). Ce raisonnement semble moins partagé par les autres niveaux hiérarchiques et en particulier les CS. Au travers du ruissellement, le risque d'entraînement des éléments minéraux en surface est perçu, mais avec un score limité, quelle que soit la fonction exercée.

Enfin, dans la rubrique « autres connaissances » (Figure 2d), les aspects liés à la qualité des intrants et la période de leur mise en place par la SODEFITEX au niveau des groupements de producteurs participent bien de l'expertise, avec toutefois des poids contrastés selon la fonction exercée dans l'entreprise. Ainsi, alors que la qualité des intrants préoccupe les niveaux hiérarchiques supérieurs CS et RR, c'est moins

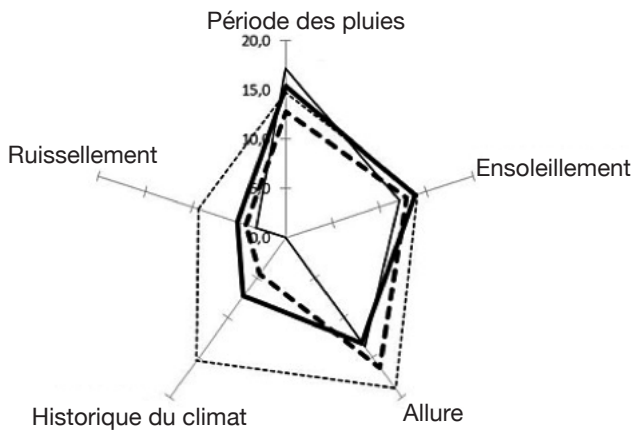
a. Observations



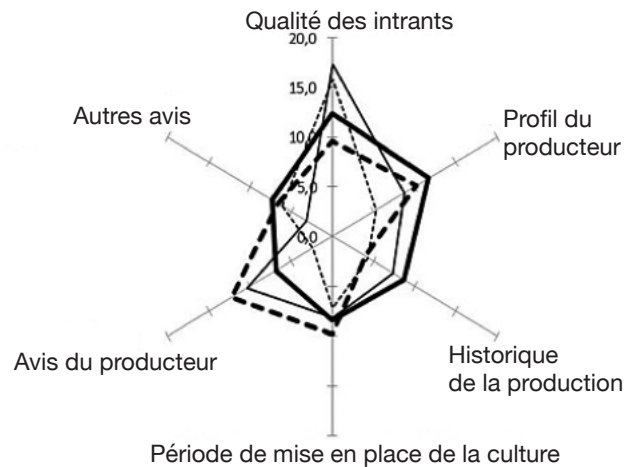
b. Pratiques culturales



c. Facteurs climatiques



d. Autres connaissances



— Conseiller technique (CT) - - - Relai technique (RT) Chef de secteur (CS) - . - . Responsable régional (RR)

Figure 2. Poids des critères mobilisés pour l’estimation du rendement moyen par type de fonction des experts — *Weighting criteria used to estimate the average yield by type of experts.*

La note attribuée à chaque critère représente la moyenne des notes attribuées par les experts enquêtés — *The score assigned to each criterion represents the average of the scores given by surveyed experts.*

le cas des experts de terrain RT et CT. Le recours à « l’historique de la production » est revendiqué quelle que soit la fonction exercée, avec toutefois un score modéré à faible. De façon attendue par rapport à leur rôle d’interface avec les producteurs, le recours à « l’avis du producteur » par les RT est notable.

Analyse multicritères. Le graphe d’analyse produit permet d’approcher la distance entre experts dans la hiérarchisation des critères adoptés pour l’expertise, selon la fonction exercée par l’expert (**Figure 3**). De façon marquée, le groupe CT apparait compact et resserré, suggérant ici une proximité de hiérarchisation

des critères et, par ce fait, une vision assez proche des critères à considérer et de leur importance relative dans l’expertise. Cette appréciation apparait moins partagée pour les autres niveaux hiérarchiques, avec en particulier une forte dispersion des avis de la part des RT qui officient au niveau du groupement de producteurs, le niveau territorial le plus fin.

3.2. Évaluation des méthodes d’estimation du rendement

Par analogie avec la caractérisation des appareils de mesures en métrologie, l’espérance de l’erreur de

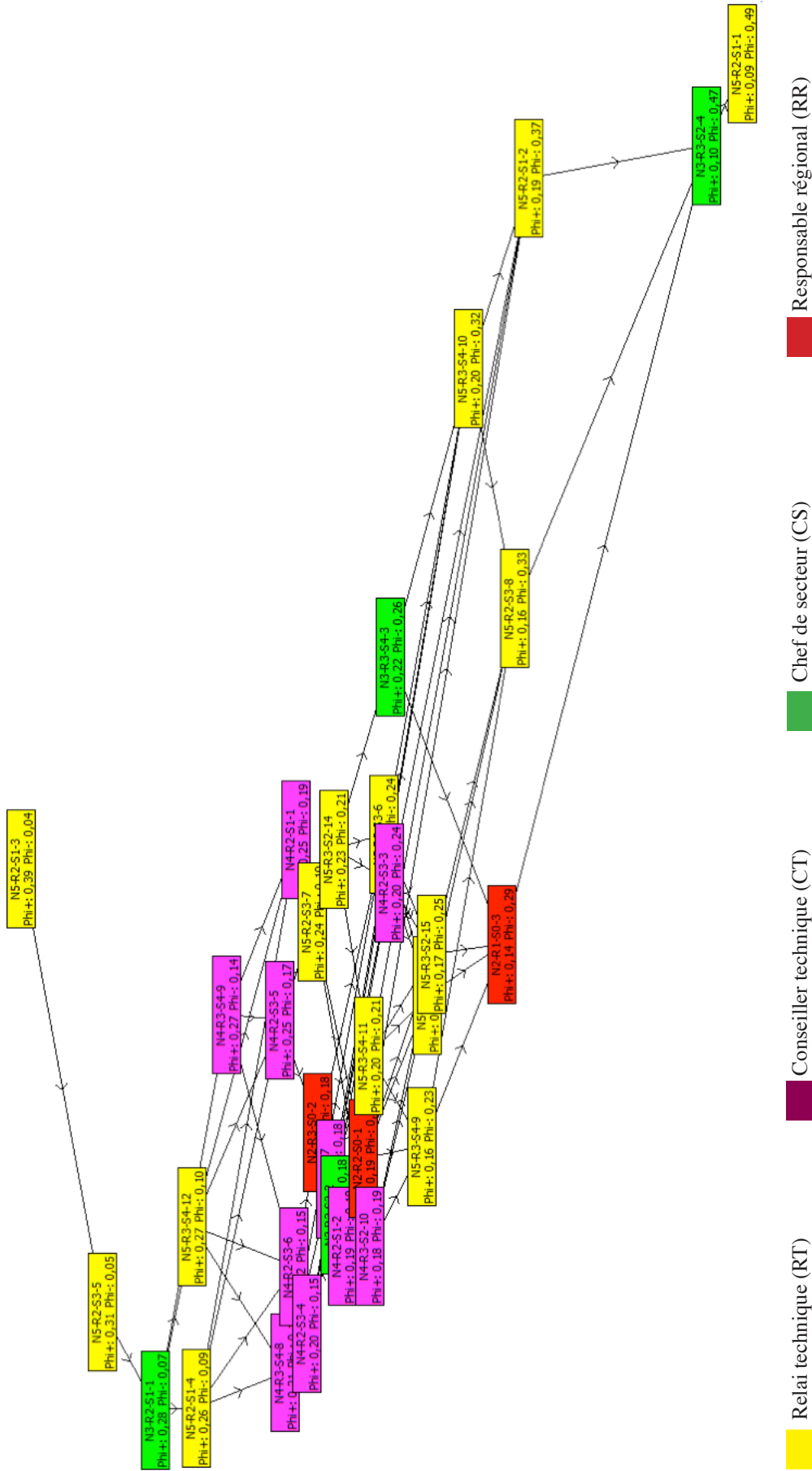


Figure 3. Analyse multicritère des critères retenus pour estimer la production et leur hiérarchisation par les experts. Un expert est représenté par un rectangle dont la couleur varie selon le niveau hiérarchique. Le code indiqué dans la première ligne du rectangle permet d'identifier l'expert. La seconde ligne indique les flux nets Φ_{i+} et Φ_{i-} , correspondants respectivement à la préférence et la non-préférence des critères adoptés par l'expert vis-à-vis des autres — *Multi-criteria analysis of criteria used to estimate production and their ranking by experts. An expert is represented by a rectangle whose color varies according to the hierarchical level. The code in the first line of the rectangle identifies the expert. The second line indicates the net flows Φ_{i+} and Φ_{i-} , corresponding respectively to the preference and the non preference of the criteria adopted by the expert compared to the others.*

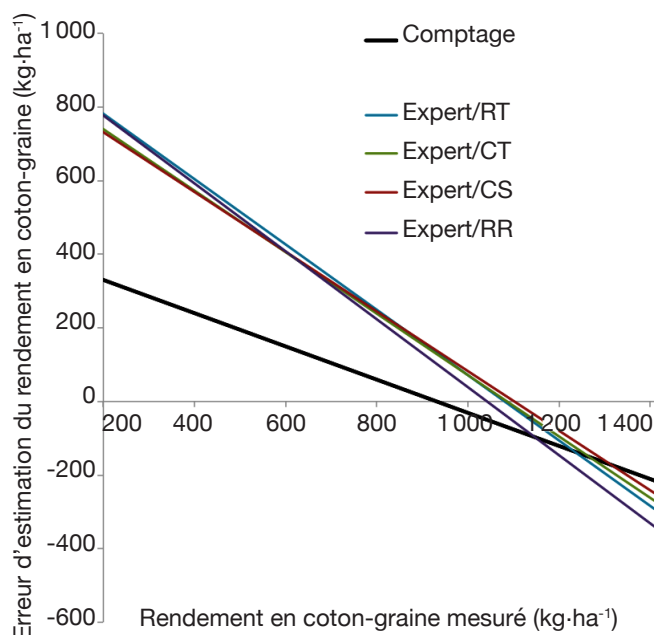


Figure 4. Biais de la prévision en fonction du rendement en coton-graine moyen mesuré. Les deux méthodes de prévision comparées sont par comptage et par expertise. L'expertise est délivrée au niveau de la région (Expert/RR), du secteur (Expert/CS), du centre de production (Expert/CT) et du groupement de producteurs (Expert/RT) — *Forecast bias as a function of average measured seed cotton yield. The two comparative forecasting methods are “yield component” and “expertise”. The expertise was delivered by expert at the regional scale (Expert/RR), sector (Expert/CS), production centre (Expert/CT), and producer group (Expert/RT).*

prévision et la magnitude de la variance de l'erreur de prévision permettent d'approcher respectivement les deux propriétés requises d'une mesure que sont la justesse et la fidélité.

Justesse de l'estimation. Comme le montrent les résultats de l'analyse de variance résumée dans le **tableau 5**, toutes les variables testées dans le modèle statistique complet ont un effet significatif à très significatif sur l'erreur d'estimation. Il n'y a donc pas de simplification possible du modèle complet avancé *a priori*.

L'effet significatif de l'interaction entre le rendement à estimer et la méthode traduit l'existence d'un biais dépendant du niveau de rendement à estimer et de la méthode. Toutes les méthodes sont approximativement sans biais quand le rendement à estimer est d'environ 1000 kg·ha⁻¹ (**Figure 4**). Le biais augmente quand le rendement à estimer s'écarte de cette valeur, avec une pente comprise entre -0,92 et -0,81 pour les méthodes d'estimation visuelles et une pente significativement plus faible de -0,45 pour le comptage. Compte tenu de la fourchette de rendement à estimer (**Tableau 1**), l'expertise, toutes modalités confondues, conduit à une forte surestimation des rendements les plus faibles, pouvant théoriquement atteindre 500 kg·ha⁻¹ pour un rendement à estimer de 300 kg·ha⁻¹. Bien que dans une moindre mesure par rapport à l'expertise, le biais de la méthode d'estimation par comptage dépend également du niveau de rendement à estimer, la pente étant significativement non nulle.

Fidélité de l'estimation. L'effet aléatoire de l'année et ses interactions avec la zone climatique, le secteur et la méthode de prévision contribuent à la variance de l'erreur de prévision à hauteur de leurs variances respectives consignées dans le **tableau 6**. L'erreur résiduelle dépend significativement de l'année considérée, de la méthode et du secteur, mais pas de la zone climatique.

Tableau 5. Résultats de l'analyse de la variance de l'erreur de prévision du rendement en coton-graine. L'erreur correspond à la différence entre la valeur prédite par l'une des méthodes d'estimation et la valeur du rendement obtenu en divisant la production mesurée par la surface recensée — *Results of the analysis of variance of the forecast error of the seed cotton yield. The error is the difference between the value predicted by one of the estimation methods and the yield value obtained by dividing the measured production by the area surveyed.*

Variable explicative	ddl numérateur	ddl dénominateur	F	Niveau de signification
Méthode	4	44	44.31	***
Rendement à prédire*Méthode	5	559	89.10	***
Zone	2	22	56.83	***
Secteur (Zone)	12	120	4.76	***
Méthode*Zone	8	559	2.62	**
Méthode*Secteur (Zone)	48	559	3.05	***

Seuils de signification — *significance thresholds* : ** : $p < 0,01$ — $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$ — $p < 0,001$.

Tableau 6. Effets aléatoires sur la variance de l'erreur d'estimation du rendement en coton-graine — *Random effects on variance of seed cotton yield estimation error.*

Variabiles explicatives de la fidélité d'estimation	Variance de l'erreur d'estimation	Erreur-type	Z value	Niveau de signification	Effet aléatoire (kg·ha ⁻¹)
Année	8 766	395	2.22	*	94 (± 63)
Zone*Année	22	323	0.07	ns	5 (± 18)
Secteur*Zone*Année	3 319	531	6.25	***	58 (± 23)
Méthode*Année	683	234	2.92	**	26 (± 15)

Seuils de signification — *significance thresholds* : ns: $p \geq 0,05$ — $p \geq 0,05$; *: $p < 0,05$ — $p < 0,05$; **: $p < 0,01$ — $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$ — $p < 0,001$.

La variance de l'erreur résiduelle variait d'un facteur de 1 à 8,4 entre les années (non montré, maximale en 2010 et minimale en 2014). Sur la **figure 5**, la variance de l'erreur résiduelle (E_{ijk}) est exprimée en ratio de la variance de l'erreur résiduelle de l'estimation Expert/CS, prise comme référence *a priori*. En ce qui concerne l'expertise, la fidélité de l'estimation Expert/RT est du même ordre de grandeur que celle produite au niveau CS (1,01), alors que l'estimation Expert/

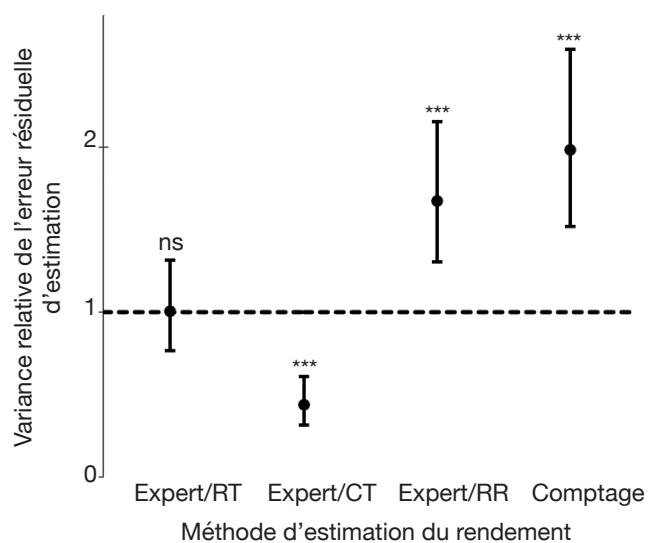


Figure 5. Variance relative de l'erreur résiduelle d'estimation du rendement moyen du secteur selon la méthode d'estimation, en référence à l'estimation produite par le chef de secteur (CS) — *Relative variance of the residual estimation error of the average yield of the sector using the estimation method, with reference to the estimate produced by the chief of sector (CS).*

Deux méthodes d'estimation sont comparées, *i.e.* par Comptage et par Expertise. L'expertise est délivrée au niveau de la région (Expert/RR), du centre de production (Expert/CT) et du groupement de producteurs (Expert/RT) — *Two estimation methods are compared, i.e. by Counting and Expertise. The expertise is delivered to the scale of the region (Expert/RR), the production centre (Expert/CT), and the producer group (Expert/RT).*

RR s'en écarte très significativement (1,68). C'est le niveau du conseiller technique (Expert/CT) qui procure l'estimation la plus fidèle, avec une variance très significativement inférieure à l'estimation de référence (0,44). Paradoxalement, et alors qu'elle repose sur des observations de terrain, c'est la méthode par comptage qui donne les résultats les moins satisfaisants en matière de fidélité, avec une variance près de deux fois plus élevée que celle produite par Expert/CS (1,99) et plus de 4,5 fois supérieure à Expert/CT (**Figure 5**). Enfin, la variance de l'erreur résiduelle est 1,4 fois plus élevée en zones sèche et médiane qu'en zone humide.

4. DISCUSSION

En cohérence avec la formalisation avancée par Grundstein (1994), les connaissances mobilisées pour implémenter l'expertise dépassent le cadre des savoirs formalisés de la SODEFITEX et impliquent le savoir-faire des experts. C'est le cas en particulier du critère de « période des pluies » qui permet d'apprécier le rayonnement solaire et de relier l'information à la maîtrise des mauvaises herbes dont l'effet sur la culture est déterminant (Douti, 1995 ; Dounias et al., 2002).

En termes d'approche, les résultats de l'étude militent pour une expertise mobilisant tout ou partie des trois options avancées *a priori* A, B et C (**Tableau 4**). L'estimation de la production selon l'approche A repose sur des connaissances analogues à celles utilisées dans les modèles de simulation du développement de la culture (Hearn, 1994 ; Jones et al., 2003). La hiérarchie de critères mobilisés (**Figure 2**) suggère un raisonnement reposant principalement sur le nombre d'organes fructifères présents au moment de l'observation et l'aptitude des cotonniers à porter cette production potentielle à terme. Parmi les indicateurs utilisés, l'observation simultanée de la densité de capsules et de fleurs permet d'accéder à l'estimation de la production potentielle selon les conditions climatiques et phytosanitaires à venir (Worley et al., 1974 ; Micinski

et al., 1992 ; Cook & El-Zik, 1993). Ces observations rejoignent les procédures en cours dans l'estimation de la production par la méthode de comptage. Elles permettent également d'estimer le nombre de capsules à venir et les conditions de maturation des capsules en regard de la position de la dernière fleur blanche sur le plant, formalisée dans l'indicateur NAWF (Bourland et al., 1992). La date de levée conditionne la durée disponible au développement de la culture et, par voie de conséquence, la probabilité d'exposition aux stress hydriques en fin de saison des pluies (M'Biandoun & Olina, 2009). L'état de développement des plantes et l'état de maîtrise des bioagresseurs permettent enfin d'affiner l'estimation (Oerke & Dehne, 2004).

La démarche empirique prévalant dans les SAP, pour estimer la production et le risque alimentaire associé en référence à une « année normale » (Tefft et al., 2007), relève de l'approche B. Les critères « historique de la production » et « historique climat » alimentent la perception de l'année en cours en référence aux conditions de campagnes passées. Le concept d'« année normale » n'a toutefois jamais été cité dans l'enquête. Au-delà de considérations historiques, le non-partage des critères de « fertilisation minérale », de « rotation culturale » et de spatialisation de la culture au niveau du territoire villageois (localisation) amputent la réflexion sur l'évolution de la fertilité des sols en lien avec les systèmes de culture en présence (Ripoche et al., 2015) et l'organisation spatiale du territoire villageois (Diarisso et al., 2015 ; Diarisso et al., 2016).

L'approche C postule d'une réflexion élargie aux contextes sociaux (Girard & Hubert, 1999), écologiques (Burkhard et al., 2010) et culturels (Dounias et al., 2013). Le recours à la typologie d'exploitation (profil du producteur) ainsi qu'à l'avis du producteur relèvent de cette approche (**Figure 2d**). Bien qu'affecté d'un score faible, le recours à « d'autres avis », auprès de représentants de l'autorité traditionnelle ou administrative, rend vraisemblable l'imprégnation du raisonnement à des considérations d'ordre économique et politique en lien avec les fonctions exercées au sein de l'entreprise (**Tableau 3**). Cet aspect de l'expertise n'a pas été renseigné plus avant dans l'étude. L'absence générale de recours aux savoirs traditionnels de nature divinatoire, pourtant avérés au Sénégal (Dounias et al., 2013), souligne l'inscription de l'expertise dans une rationalité scientifique nourrie des savoirs de l'entreprise et du savoir-faire des experts.

La démarche adoptée, empruntée à la systémique (Le Moigne, 1994), visait à mettre en évidence des points de vue contrastés selon la fonction de l'expert dans l'organisation pyramidale de la SODEFITEX. Or, les critères identifiés *a priori* par le groupe de travail et validés *a posteriori* par les praticiens suggèrent une relative communauté de vision, transversale aux niveaux hiérarchiques (**Figure 2**). Cette vision qui

tendrait à invalider l'hypothèse de travail initiale de connaissances différentes selon que l'expert conduise plutôt une activité proche du terrain et des producteurs (RT et CT) que de gouvernance (CS et RR) est toutefois à pondérer. Des divergences d'appréciations sensibles apparaissent sur le poids des critères, notamment de « l'historique de la production » (**Figure 2c**) par les RR et à l'opposé du recours à « l'avis du producteur » par les RT (**Figure 2d**).

En termes de performances, l'analyse statistique met en évidence l'importance du niveau organisationnel et territorial dans la fidélité de la prévision par voie d'expertise (**Figure 5**). Alors que Campbell (1990) propose le village comme niveau à considérer dans les SAP, les résultats de l'étude montrent une faible fidélité des prévisions au niveau du groupement villageois, associée à une forte divergence quant à la hiérarchisation des critères par les RT (**Figure 3**). Les performances particulières enregistrées par les CT au niveau du centre de production suggèrent l'avantage cumulé de la formation technique, de l'accès aux données de l'entreprise et d'un référentiel établi sur plusieurs terrains et villages par rapport aux CT.

En ce qui concerne la quantification du rendement moyen, les résultats indiquent une forte subjectivité des prévisions quelle que soit la méthode employée (**Figure 4**). La dépendance très significative des erreurs de prévision vis-à-vis du rendement à estimer interpelle d'autant plus qu'elle affecte aussi les résultats de la méthode par comptage (**Figure 4**). S'agissant de méthodes par voie d'expertise, l'hypothèse d'une subjectivité de l'estimation sous le poids des enjeux économiques et politiques est avancée par Tefft et al. (2007) à propos des SAP en Afrique. Sous réserve de cette hypothèse, le biais observé sur les résultats de la méthode par comptage pourrait être attribué au poids moyen capsulaire retenu pour accéder à la production à partir du nombre de capsules moyen par unité de surface. Ce biais systématique sur une méthode reposant *a priori* sur des bases scientifiques attire l'attention sur l'empirisme lié à l'attribution arbitraire d'un poids moyen capsulaire, qui ne permet pas de tenir compte des conditions conjoncturelles de la campagne en cours sur cette composante du rendement (Wang et al., 2016). Ces résultats n'excluent toutefois pas la remise en cause de l'hypothèse assumée par les auteurs d'une fiabilité des données de superficies réellement cultivées et qui pose problème dans d'autres études (Todoroff et al., 2012).

5. CONCLUSIONS

Dans un contexte de faible documentation scientifique sur l'estimation précoce de la production par voie d'expertise, les résultats de l'étude éclairent sur les

connaissances mobilisées et la performance des prévisions délivrées, ouvrant ainsi la voie à une critique rationnelle de l'expertise. Ce travail constitue un préalable à une réflexion de la part de la SODEFITEX sur les variables explicatives nécessaires à l'expertise pour en améliorer les performances. À cet égard, et outre les critères partagés identifiés, il est possible que certaines des connaissances avancées *a priori* aient un sens vis-à-vis des spécificités locales des secteurs, en matière notamment d'aléas climatiques et de l'impact d'évènements extrêmes (vent, inondation). La diversité des points de vue mise en évidence par l'analyse multicritère, entre niveaux hiérarchiques et entre agents de même niveau, souligne le besoin de confrontation des connaissances pour faire émerger les variables explicatives nécessaires à la prévision et tendre vers une objectivité accrue des experts. S'agissant de problèmes émergents, les experts devront être aussi formés aux risques climatiques à venir et à leur impact sur la production, dans ses composantes techniques et sociales. L'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) dispose de longues séries climatiques dans la zone cotonnière et pourrait être, avec l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), un partenaire privilégié de ce processus d'apprentissage.

Abréviations

CC : changement climatique
 CS : chefs de secteur
 CT : conseillers techniques
 NC : nombre moyen de capsules saines
 PMC : poids moyen capsulaire
 RR : responsables régionaux
 RT : relais techniques
 SAP : systèmes d'alerte précoce

Remerciements

Ce projet a été financé par la SODEFITEX et appuyé scientifiquement par le CIRAD. Les auteurs adressent leurs remerciements aux collègues de la SODEFITEX et aux partenaires producteurs de la FNPC, pour leur contribution extrêmement précieuse dans la collecte de données. Notre gratitude à Monsieur Alfousseynou Coly de BAMTAARE pour la réalisation des cartes du bassin cotonnier avec toutes les informations requises.

Bibliographie

Bourland F.M., Oosterhuis D.M. & Tugwell N.P., 1992. Concept for monitoring the growth and development of cotton plants using main-stem node counts. *J. Prod. Agric.*, **5**(4), 532.

- Burkhard B., Kroll F. & Müller F., 2010. Landscapes' capacities to provide ecosystem services – a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, **15**(1), 1-22.
- Campbell D.J., 1990. Community-based strategies for coping with food scarcity: a role in African famine early-warning systems. *GeoJournal*, **20**(3), 231-241.
- Cook C.G. & El-Zik K.M., 1993. Fruiting and lint yield of cotton cultivars under irrigated and nonirrigated conditions. *Field Crops Res.*, **33**(4), 411-421.
- Deguine J.-P., Vaissayre M. & Hau B., 1998. *Bemisia tabaci* sur cotonnier au Sénégal : analyse de la situation et recommandations. *Agric. Dev.*, **20**, 19-23.
- Diarisso T. et al., 2015. Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, **101**(3), 295-315.
- Diarisso T. et al., 2016. Soil variability and crop yield gaps in two village landscapes of Burkina Faso. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, **105**(3), 199-216.
- Doukpolo B., 2014. *Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine*. Thèse de doctorat : Université de Abomey-Calavi (Bénin).
- Dounias E., De Visscher M.-N., Ickowicz A. & Clouvel P., 2013. Les sociétés à agriculture de subsistance. In : Soussana J.-F., ed. *S'adapter au changement climatique : agriculture, écosystèmes et territoires*. Versailles, France : Éditions Quæ, 171-194.
- Dounias I., Aubry C. & Capillon A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agric. Syst.*, **73**(3), 233-260.
- Douti P.Y., 1995. Cotonnier contre mauvaises herbes : quelle est la période de concurrence ? *Agric. Dev.*, **7**, 31-36.
- Dury S., Fouilleux E. & Bricas N., 2010. La production de statistiques pour les politiques de sécurité alimentaire : entre visions du monde et enjeux de pouvoir. Le cas du Mali. *Stateco*, **105**, 7-18.
- Girard N. & Hubert B., 1999. Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids: the example of a knowledge-based model on grazing management. *Agric. Syst.*, **59**(2), 123-144.
- Grundstein M., 1994. Développer un système à base de connaissances : un effort de coopération pour construire en commun un objet inconnu. In : *Actes de la journée Innovation pour le travail en groupe, Cercle pour les Projets Innovants en Informatique, 1994, Paris*.
- Hearn A.B., 1994. OZCOT: a simulation model for cotton crop management. *Agric. Syst.*, **44**(3), 257-299.
- Hoogenboom G., 2000. Contribution of agrometeorology to simulation of crop production and its applications. *Agric. For. Meteorol.*, **103**, 137-157.
- Hulme M., 1992. Rainfall changes in Africa: 1931–1960 to 1961–1990. *Int. J. Climatol.*, **12**(7), 685-699.

- INSD (Institut National de la Statistique et de la Démographie), 2017. *Bulletin trimestriel de conjoncture. 2^e trimestre 2017. Burkina Faso*, http://www.insd.bf/n/n/contenu/pub_periodiques/bulletins_conjoncture/Bulletin_Conjoncturel_2017_T2.pdf, (21/08/2018).
- Jones J.W. et al., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*, **18**(3-4), 235-265.
- Krueger T. et al., 2012. The role of expert opinion in environmental modelling. *Environ. Modell. Software*, **36**, 4-18.
- Launay M. & Guerif M., 2005. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **111**(1-4), 321-339.
- Le Moigne J.L., 1994. *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Paris : Presses universitaires de France.
- Leroux L. et al., 2014. How reliable is the MODIS land cover product for crop mapping Sub-saharan agricultural landscapes? *Remote Sens.*, **6**(9), 8541-8564.
- Leroux L. et al., 2016. Crop monitoring using vegetation and thermal indices for yield estimates: case study of a rainfed cereal in semi-arid West Africa. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, **9**(1), 347-362.
- Longino H.E., 1990. *Science as social knowledge: values and objectivity in scientific inquiry*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
- M'Biandoun M. & Olina J., 2009. Pluviosité en région soudano-sahélienne au Nord du Cameroun : conséquences sur l'agriculture. *Agron. Afr.*, **18**(2), 95-104.
- Maner B.A., Worley D.C., Harrell D.C. & Culp T.W., 1971. A geometrical approach to yield models in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Crop Sci.*, **11**(6), 904.
- Mareschal B. & De Smet Y., 2009. Visual PROMETHEE: developments of the PROMETHEE & GAIA multicriteria decision aid methods. In: *Proceedings of the 16th 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 8-11 December 2009, Hong Kong, China*. IEEE, 1646-1649.
- Micinski S., Colyer P.D., Nguyen K.T. & Koonce K.L., 1992. Cotton white flower counts and yield with and without early-season pest control. *J. Prod. Agric.*, **5**(1), 126.
- Mishra A. et al., 2008. Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. *Agric. For. Meteorol.*, **148**(11), 1798-1814.
- Moussa A.A., Crétenet M., Nibouche S. & Gaborel C., 2003. *Impact d'une attaque précoce de chenilles de la capsule sur le rendement en coton graine en fonction de la pluviosité au Nord Cameroun*. Montpellier, France : Cirad ; Maroua, Cameroun : Irad-Prasac.
- Ndour A., 2015. *Formulaire d'enquête de l'étude sur les méthodes d'estimation visuelle du coton*. Google Forms, <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeKf9Azh9xIDrkUv92vM84XAtiV7ZU1852OqnfsmenUSpdj2A/viewform>, (23/08/2018).
- Ndour A. et al., 2006. Développement d'un outil de simulation de la croissance du cotonnier ouvert à l'expertise de l'utilisateur. *Cah. Agric.*, **15**(1), 85-91.
- Ndour A. et al., 2017. Changement climatique et production cotonnière au Sénégal : concevoir autrement les stratégies de diffusion des variétés. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **21**(1), 22-35.
- Oerke E.-C. & Dehne H.-W., 2004. Safeguarding production — Losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Prot.*, **23**(4), 275-285.
- Popper S.K.R., 1972. *Objective knowledge: an evolutionary approach*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Ripoche A. et al., 2015. Cotton as an entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems – Evidence from a long-term experiment in southern Mali. *Field Crop. Res.*, **177**, 37-48.
- Sagna P. et al., 2015. Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? *Pollut. Atmos.*, **227**, 1-17.
- Sultan B. & Gaetani M., 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Front. Plant Sci.*, **7**, 1262.
- Taylor C.M. et al., 2017. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, **544**(7651), 475-478.
- Tefft J., McGuire M. & Maunder N., 2007. *Planifier l'avenir. Évaluation des systèmes d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Rapport de synthèse*. Rome : FAO.
- Todoroff P., Martiné J.-F. & Gozé E., 2012. Prévision de la récolte de canne à sucre à partir d'un modèle de croissance. Exemple de La Réunion. In : *Diaporama du Congrès sucrier ARTAS-AFCA, la canne à sucre de développement et d'innovation, 15-19 septembre 2012, La Réunion, Maurice*.
- Vancutsem C. et al., 2013. Harmonizing and combining existing land cover/land use datasets for cropland area monitoring at the African continental scale. *Remote Sens.*, **5**(1), 19-41.
- Wang R. et al., 2016. Drought effects on cotton yield and fiber quality on different fruiting branches. *Crop Sci.*, **56**(3), 1265.
- Worley S., Culp T.W. & Harrell D.C., 1974. The relative contributions of yield components to lint yield of upland cotton, *Gossypium hirsutum* L. *Euphytica*, **23**(2), 399-403.