



## Les bénéfices des services climatiques pour l'agriculture au Niger



*Ce document est extrait d'un rapport global de l'analyse climatique, des services climatiques et des interventions du PAM dans les sites de Karkara, Sahiya, Darey et Toungfani (Niger) qui s'intitule : « Analyse environnementale et changement climatique dans trois communes d'intervention du Programme Alimentaire Mondial (PAM) au Niger », paru en novembre 2007.*

*Ce rapport a été réalisé dans le cadre d'une prestation entre le Programme Alimentaire Mondial (PAM) - Niger et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). L'étude a été réalisée par une équipe pluridisciplinaire franco-nigérienne composée de : Ramatou Hassane, LASDEL, Université de Tillabery, Niger Bénédicte Gastineau, IRD, France*

*Françoise Guichard, CNRS, France Benjamin Sultan, IRD, France Théo Vishel, Université Grenoble Alpes, Grenoble (France) avec l'appui d'Oumarou Malam Issa (IRD) et Gregory Giraud (IRD).*

*L'objectif de la prestation est d'analyser les tendances climatiques et socio-économiques dans quatre sites (Darey, Toungfani, Sahiya et Karkara) répartis dans trois communes (Toudikiwindi, Bagaroua et Allakaye) au Niger. Il comprend trois parties :*

- \* Analyse des précipitations*
- \* Analyse des changements de températures*
- \* Les bénéfices des services climatiques pour l'agriculture au Niger*

*Rédaction : Benjamin Sultan, IRD*

**Etre en mesure d'anticiper les fluctuations climatiques quelques jours à quelques mois à l'avance peut faire une vraie différence dans les stratégies d'adaptation des populations africaines au changement climatique** et constituer un premier pas pour augmenter les rendements et réduire les risques de crises alimentaires.

En effet, l'agriculture pluviale étant extrêmement sensible aux aléas climatiques, l'agriculteur sahélien a développé une grande diversité de pratiques pour s'adapter à la forte variabilité climatique qu'il observe. Compte-tenu des retombées potentiellement dramatiques d'une mauvaise saison des pluies (famines, migrations forcées), les pratiques de cet agriculteur sont souvent entachées d'une très forte aversion au risque (c'est-à-dire qu'il tend à éviter les choix présentant un risque de mauvaise récolte même s'ils sont plus productifs en moyenne ; Affholder 1997 ; de Rouw 2004).

Si elles sont le plus souvent très efficaces, lui permettant de produire de quoi survivre en cas de sécheresse prolongée, elles limitent sévèrement le développement de son activité et le maintiennent dans la pauvreté (CGIAR 2009).

Pendant les bonnes années en termes de pluviométrie, sa production reste basse car il ne prend aucun risque pour profiter de ces conditions plus favorables (apports d'intrants, densification de semis, variété améliorée). De plus les changements socio-économiques (population qui augmente, compétition sur les ressources qui se raréfient) et la menace d'une variabilité climatique accrue en réponse au réchauffement global peuvent remettre totalement cette stratégie en question.

**L'information et la prévision climatique sont en mesure d'accompagner une nécessaire augmentation des rendements agricoles** pour orienter les choix tactiques (à court terme comme le choix de la variété, date de semis) et/ou stratégiques (à plus long terme comme le choix du système de culture).

**Cette recherche-action est décrite par le concept « d'agriculture climato-intelligente »** développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) depuis 2010 et fait partie des « **services climatiques** » qui consistent à s'appuyer sur l'information climatique (données, prévisions, scénarios) pour fournir une aide à la décision dans la mise en œuvre de mesures d'atténuation et d'adaptation. Au niveau international, l'Organisation Météorologique Mondiale a reçu mandat des Nations Unies en 2009 pour organiser cette activité et en garantir la qualité, via le « Cadre Mondial pour les Services Climatologiques ».

Cependant **rares sont les études qui mettent en évidence les bénéfices apportés par cette information climatique en Afrique de l'Ouest** alors qu'elles sont cruciales pour isoler les variables climatiques les plus pertinentes sur lesquelles la communauté des climatologues devrait se focaliser et pour permettre l'adoption de la prévision dans le processus de décision (Meza et al. 2008).

En effet, même si les prévisions saisonnières sont réalisées et diffusées tous les ans depuis 1998 en Afrique de l'Ouest, la diffusion de ces prévisions et leur adoption par les agriculteurs sont trop partielles pour permettre une évaluation ex-post qui mesurerait les retombées réelles de l'utilisation des prévisions par les agriculteurs (Meza et al. 2008).

L'évaluation doit donc se faire de manière ex-ante en utilisant des approches permettant d'évaluer les bénéfices des prévisions avant même son adoption par les paysans (Sultan et al. 2010 ; 2013). Ces approches ont l'avantage de fournir des arguments chiffrés qui sont souvent nécessaires pour mobiliser des financements et des partenaires institutionnels. Elles peuvent également mettre en évidence les bénéfices à l'amélioration des systèmes de prévision actuels en testant par exemple l'opportunité de fournir à l'utilisateur de nouveaux produits adaptés à leurs besoins. Ce dernier point est particulièrement important en Afrique de l'Ouest où la prévision PRESAO se focalise presque exclusivement sur le cumul saisonnier des pluies alors qu'une prévision des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse constitue une priorité parmi les attentes des agriculteurs (Ingram et al. 2002).

Pour espérer tirer des bénéfices de l'utilisation de la prévision climatique, il doit exister des décisions viables et sensibles au climat en réponse à la prévision (Hansen 2002). Meza et al. (2008) soulignent à ce propos que les évaluations ex ante des prévisions saisonnières prennent généralement trop peu en compte ces stratégies d'adaptation en réponse à la prévision et sous-estiment ainsi la valeur de l'information diffusée.

Pourtant, comme le montrent Luseno et al. (2003), l'étude des stratégies des agriculteurs est un point fondamental car la valeur finale de la prévision dépend principalement de la capacité de réaction des paysans. Selon Roncoli et al. (2009), les paysans burkinabè utiliseraient jusqu'à quatre stratégies différentes, avec 38% d'entre eux seulement une et 27% deux stratégies. Certaines études (e.g. O'Brien et al. 2000) concluent que ces prévisions saisonnières ne changent pas réellement les pratiques culturales : cela peut être dû au fatalisme, au manque de confiance ou à la présence d'autres

systèmes de prévisions locaux. Cependant, **cela ne signifie pas nécessairement que la prévision saisonnière est inutile mais plutôt qu'il y a un problème avec le format de l'information ou que les agriculteurs ne lui accordent que peu de confiance**. Celle-ci doit être facile à comprendre et doit surtout être donnée au moment opportun, i.e. **au moins un mois avant le début de la saison** (Ingram et al. 2002), pour que les exploitants aient le temps d'acheter les semences et les intrants.

Notons que la valeur d'une telle information dépend également du taux d'acceptation des usagers.

Deux études ont permis une évaluation des bénéfices de l'utilisation de l'information climatique au Niger où les paysans auraient tendance à changer la variété du mil, la date de semis et le niveau de fertilisation s'ils avaient des informations sur le début, la fin de la saison pluvieuse, la quantité totale de pluie et sa répartition dans la saison (Roudier et al. 2011 ; 2016).

Roudier et al. (2011) montrent un bénéfice de la prévision saisonnières sur les revenus des paysans avec un impact positif sur le revenu de +6.9%. Le bénéfice espéré est le plus fort pour les années humides (+12.1%) que pour les années sèches (+7.1%).

Les différences d'augmentation entre les années sèches et humides sont dues aux stratégies culturales : en année humide, celles-ci diffèrent beaucoup plus de la situation de contrôle qu'en année sèche.

Les saisons humides, souvent plus longues, permettent notamment l'utilisation de la variété à cycle plus long (Somno) et des fertilisants qui améliorent les rendements. Ces ajustements ne sont pas possibles ou moins efficaces en année sèche, car pour l'essentiel, en l'absence de prévision, les agriculteurs choisissent une stratégie culturale proche de celle qui s'avère optimale en saison sèche, du fait de leur aversion pour le risque.

Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux de Patt et al. (2005), calculés dans le cadre d'une étude ex post pour deux années, au Zimbabwe. Cette étude indique que l'utilisation de prévisions a entraîné sur les deux années une augmentation de 9.4% dans les récoltes. Elle souligne également que l'augmentation est meilleure durant les années humides (+18.7%).

Roudier et al. (2016) ont utilisé une approche qui prend explicitement en compte l'aversion pour le risque et se concentre sur deux types d'agriculteurs typiques ayant des capacités d'adaptation restreintes et importantes, en fonction de la disponibilité d'options de décision viables sensibles aux informations climatiques. Les résultats montrent que **les prévisions météorologiques à l'échéance de 10 jours**, seules ou combinées avec des prévisions saisonnières pourraient être très bénéfiques pour tous les types d'agriculteurs. Par exemple, la variation médiane de changement de revenu avec des prévisions à 10 jours varie de + 1,8% à + 13% selon les possibilités d'adaptation. Roudier et al. (2016) montrent également que, dans la plupart des cas, les agriculteurs ayant accès aux engrais et les terres arables plus vastes profitent davantage des services climatiques.

Malgré ces résultats positifs, il faut souligner que des pertes de revenus peuvent se produire dans environ 20% des cas lors de l'utilisation de ces prévisions, en cas de prévision erronée par exemple, ce qui peut être un facteur limitant de leur adoption effective.

Enfin il faut souligner que la plupart des études citées ci-dessus ne traitent pas d'un point extrêmement important concernant l'utilisation de la prévision saisonnière pour l'aide à la décision qui est celui de sa diffusion auprès des agriculteurs et de son adoption au sein des pratiques locales.

Les moyens de communications de la prévision, son interprétation par les agriculteurs et son intégration parmi les différentes stratégies locales d'adaptation aux aléas climatiques sont pourtant des enjeux cruciaux pour espérer tirer des bénéfices des informations climatiques.

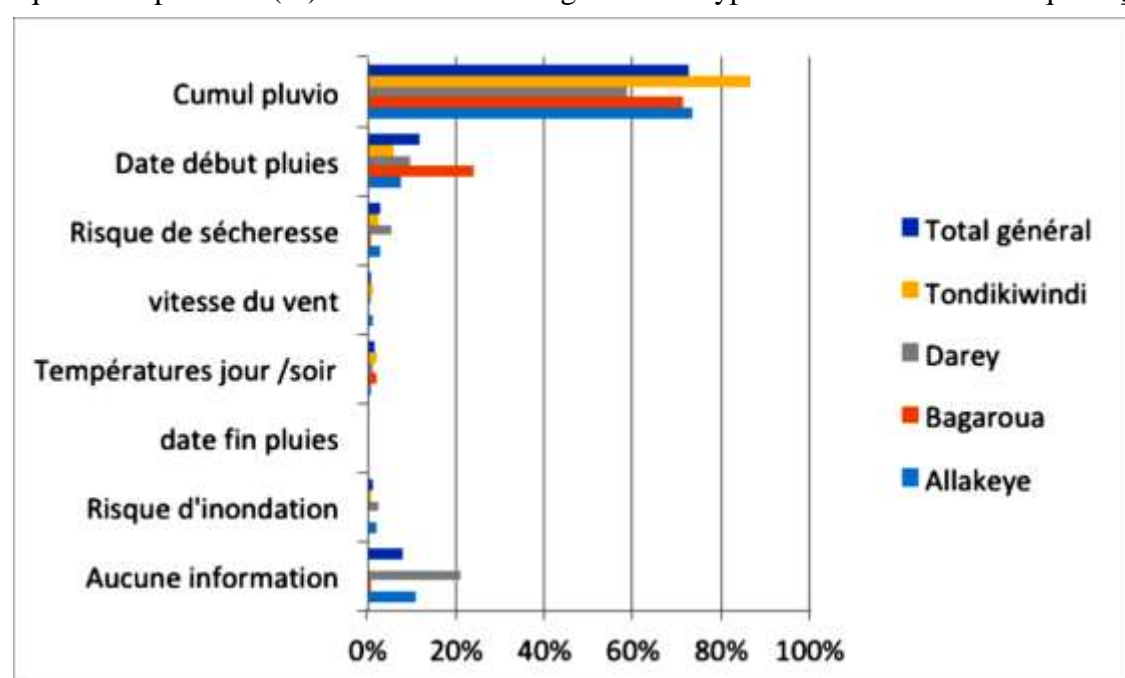
Ils nécessitent de mettre en place un dialogue entre les producteurs d'information climatique et les utilisateurs comme celui amorcé par exemple par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal où les prévisionnistes font des séminaires itinérants dans les exploitations agricoles au Sénégal pour non seulement informer les agriculteurs sur les possibilités des prévisions mais aussi pour apprendre des agriculteurs sur leurs besoins et leurs stratégies agricoles.

D'autres exemples de ce type sont en cours dans le cadre des projets CCAFS et ESCAPE avec la mise en place d'ateliers participatifs où les producteurs sont à même de s'exprimer sur ces innovations telles que la prévision climatique (Roudier et al. 2014). Faire participer les acteurs dans ce processus de transfert de connaissances scientifiques vers les acteurs est très certainement un prérequis pour l'adoption de ces mesures in fine pour l'aide à la décision.

## 1. Accès et diffusion de l'information météorologique

Sur les trois communes (4 sites), on note que plus de 91% des personnes enquêtées déclarent avoir accès à l'information météorologique. C'est particulièrement notable à Bangaroua et Toungfina où environ 1% de la population n'a pas eu accès à l'information météorologique.

Graphique 1 : Répartition (%) des chefs de ménage selon le type d'information climatique reçue



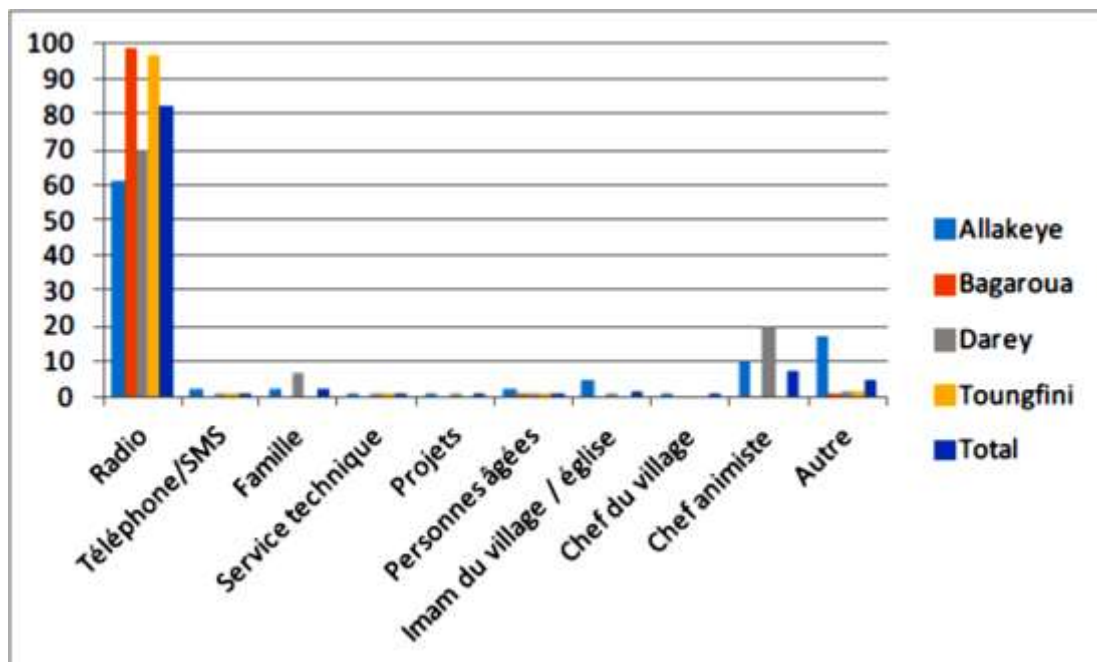
Source : Enquête PAM - IRD - 2017

Près de 80% ont accès au cumul pluviométrique mais 24% des personnes interrogées ont eu accès aussi au début de la saison des pluies.

La radio est la principale source de diffusion de l'information météorologique (83% sur les 3 villages et jusqu'à 97% à Bagaroua). La religion joue un rôle important à Allakaye avec l'Imam et le Chef animiste qui apportent 15% des informations météorologiques et encore plus à Darey où 20% des chefs de ménage sont informés par le chef animiste (19%) et l'Imam (1%).

La radio qui diffuse l'information météorologique est essentiellement publique à Bagaroua (près de 100%), à dominance publique à Toungfini (87%) et majoritairement privée à Darey (51%) et à Allakaye (62%).

Graphique 2 : Répartition des chefs de ménage (%) selon la source de l'information climatique (toutes informations confondues)

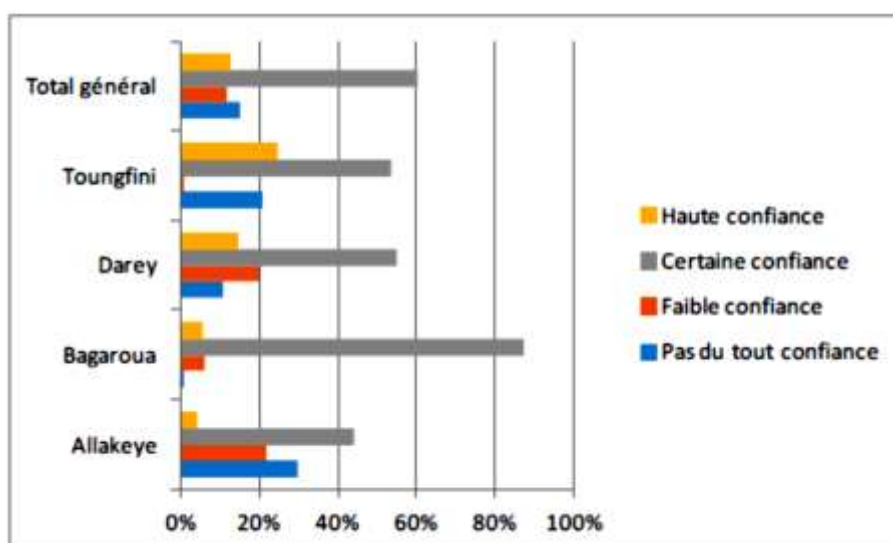


Source : Enquête PAM - IRD - 2017

La majeure partie des informations météorologiques parviennent en début de saison des pluies (plus de 65% sur les 4 sites). Les populations enquêtées d'Allakaye (19%) et dans une moindre mesure de Bagaroua (11%) ont accès aux infos en milieu de saison. Toungfini a eu accès à l'info tout au long de la saison (48%). A Darey, 67% ont eu une information en début de saison et 25% n'ont eu aucune information.

## 2. Confiance en l'information météorologique

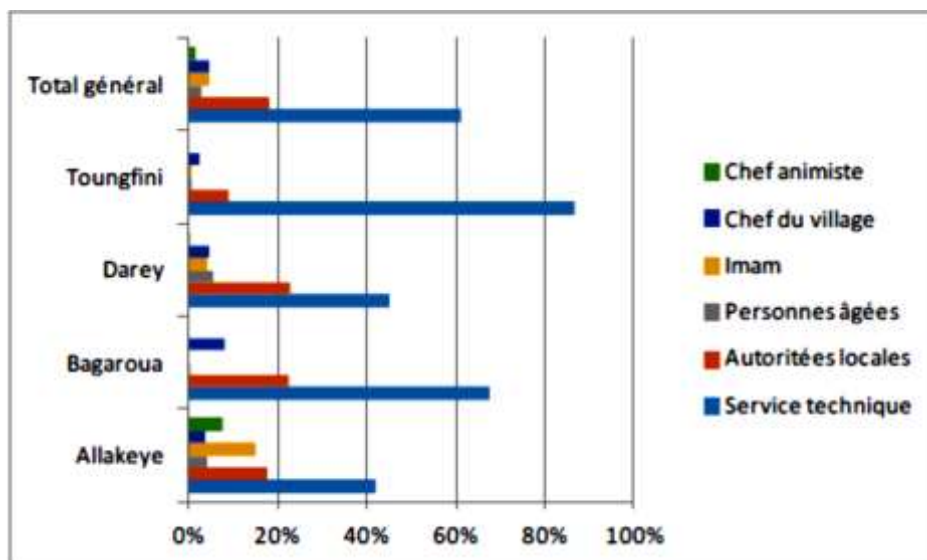
Graphique 3 : Répartition des chefs de ménage selon la confiance qu'ils accordent à l'information climatique



Source : Enquête PAM - IRD - 2017

Des différences importantes entre les trois localités en termes de taux de satisfaction et de confiance vis à vis de l'information météorologique. 93% des personnes enquêtées à Bagaroua sont très satisfaits et 99% des personnes interrogées à Toungfani se déclarent satisfaits. C'est très différent à Allakaye où 45% des enquêtés sont peu satisfaits et où la majorité des personnes interrogées à Allakaye n'ont pas confiance à l'information climatique (52%). Ce taux de personnes qui n'ont pas confiance en l'information météorologique est seulement de 7% à Bagaroua et de 21% à Toungfani.

Graphique 4 : Répartition (%) des chefs de ménage selon la source d'information climatique à qui ils accordent le plus de confiance



Source : Enquête PAM - IRD - 2017

On note aussi une grande disparité des réponses à Toungfani avec des personnes n'accordant pas du tout confiance en cette information (21%) ou une haute confiance (25%) alors que les résultats sont plus homogènes dans les autres localités. Une analyse approfondie pour comprendre cette hétérogénéité entre les localités et au sein d'une même localité comme à Toungfani ou Allakaye est certainement nécessaire dans une phase préalable.

Les populations de Bagaroua et de Toungfani accordent d'abord leur confiance aux services techniques / autorités locales (respectivement 90 et 95%), moins à Darey (78%) et beaucoup moins à Allakaye (60%). Encore une fois on voit le poids de la religion à Allakaye où 19% ont d'abord confiance dans les autorités religieuses (Imam / Chef animiste) (moins de 1% à Toungfani, 4% à Darey et 0% à Bagaroua).

La principale raison d'insatisfaction quant aux informations climatiques est le manque d'accès (56%). Viennent ensuite le manque de fiabilité (22%) et la croyance en Dieu (21%). La religion semble être le facteur qui limite la portée des services météorologiques à Allakaye. Dans cette localité, les populations ont davantage recours à des méthodes traditionnelles pour la prévision météorologiques (près de 24%) alors qu'elles sont très peu utilisées à Bagaroua (<4%), à Darey (10%) et à Toungfani (8%).

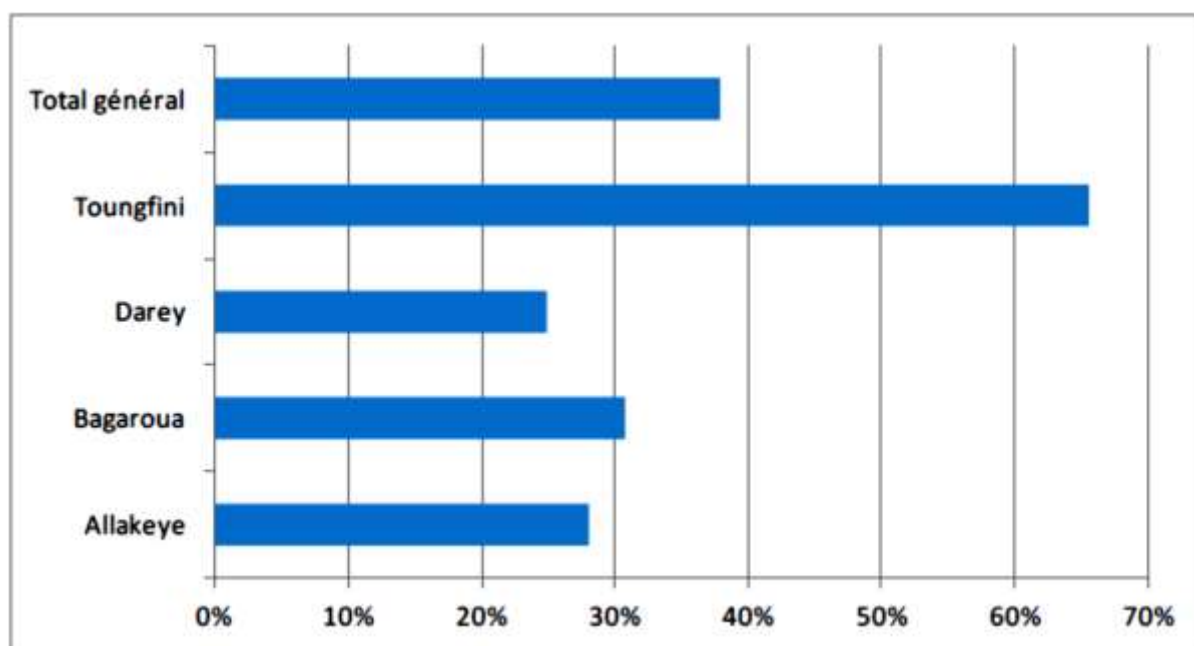
### 3. Utilisation de l'information météorologique

Les résultats sur les trois communes montrent que la majorité des enquêtés ne prennent pas de mesure en se basant sur l'information météorologique (62% des enquêtés).

Si on prend un sous-groupe qui a accès à l'information climatique, on a toujours une majorité de personnes qui ne prennent pas de mesures (59%) ce qui démontre que cela semble ne résulter pas d'un

problème d'accès à l'information. En outre les localités d'Allakaye, de Darey et de Bagaroua montrent des résultats sensiblement similaires avec près de 70% des enquêtés qui ne prennent pas de mesures.

Graphique 5 : Proportion (%) de chefs de ménage qui prennent des mesures en fonction de l'information climatique



Source : Enquête PAM - IRD - 2017

Pourtant à Bagaroua on a des personnes qui disent avoir accès, besoin et avoir confiance en l'information climatique contrairement à Allakaye avec une forte proportion de personnes sceptiques vis-à-vis de cette information. C'est un peu plus contrasté à Toungfina où si on prend le sous-échantillon qui a eu accès à l'information, on a même une majorité des répondants qui disent prendre des mesures (66%).

Le questionnaire sur les innovations fait ressortir Toungfina comme la localité la plus innovantes avec davantage de changements de cultures, de variétés et l'utilisation de variétés améliorées que dans les deux autres localités. Le questionnaire sur les caractéristiques des ménages fait apparaître Allakaye comme une localité plus contrainte avec des exploitations plus petites et des problèmes de fertilité évoqués par les personnes enquêtées.

La majorité des réponses à l'information sont des réponses techniques (semences, préparation des champs...) à Bagaroua (97%) et dans la commune de Tondikiwindi (75%). C'est très différent à Allakaye (seules 30% de réponses techniques). Les réponses sont plutôt spirituelles (15%), socio-économiques avec les migrations (15%) et la diversification des activités (26%). Ces résultats corroborent ceux de l'enquête sur les caractéristiques socio-économiques des trois localités qui montrent notamment que les localités qu'il y a plus de surfaces cultivées et en jachère à Bagaroua et Toungfina avec une pénurie de main d'oeuvre.

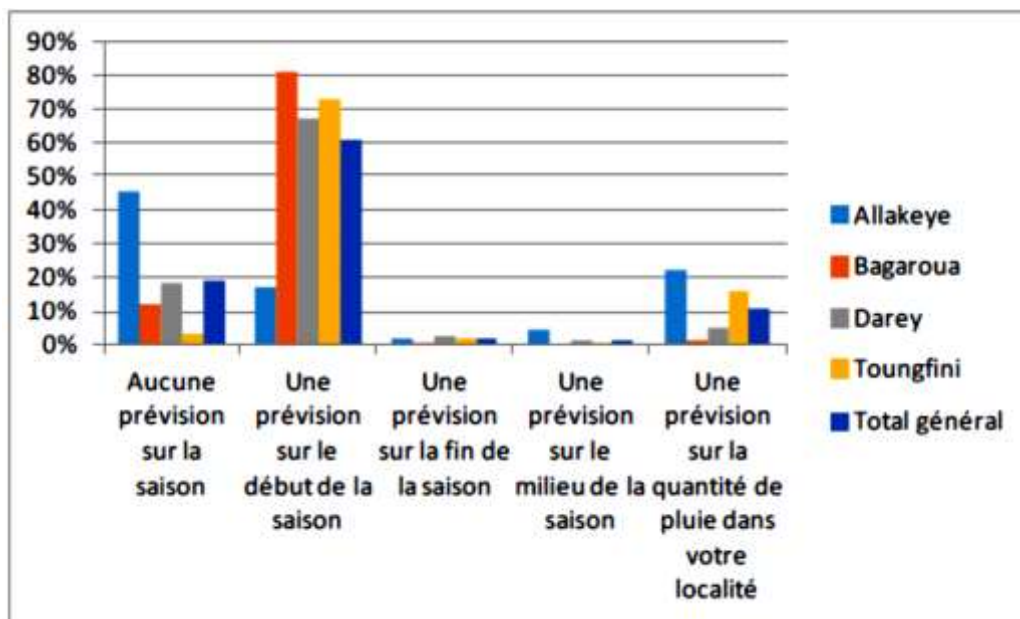
#### 4. Les besoins en termes d'information météorologique

D'après les chefs de ménage, l'information climatique la plus importante pour leurs activités est la date de semis/début (autour de 79% des réponses) puis le cumul de pluie des pluies (10% des réponses).

Le besoin en termes de prévision est principalement autour du début de la saison des pluies (61% des répondants sur les trois localités) puis la prévision du cumul des pluies (11%). Ce n'est pas cohérent

avec les variables les plus importantes pour leurs activités mais cela peut s'expliquer par le fait que les répondants ont déjà accès à l'information sur le cumul pluviométrique.

Graphique 6 : Répartition des chefs de ménages (par site) selon l'information climatique dont ils auraient besoin en priorité

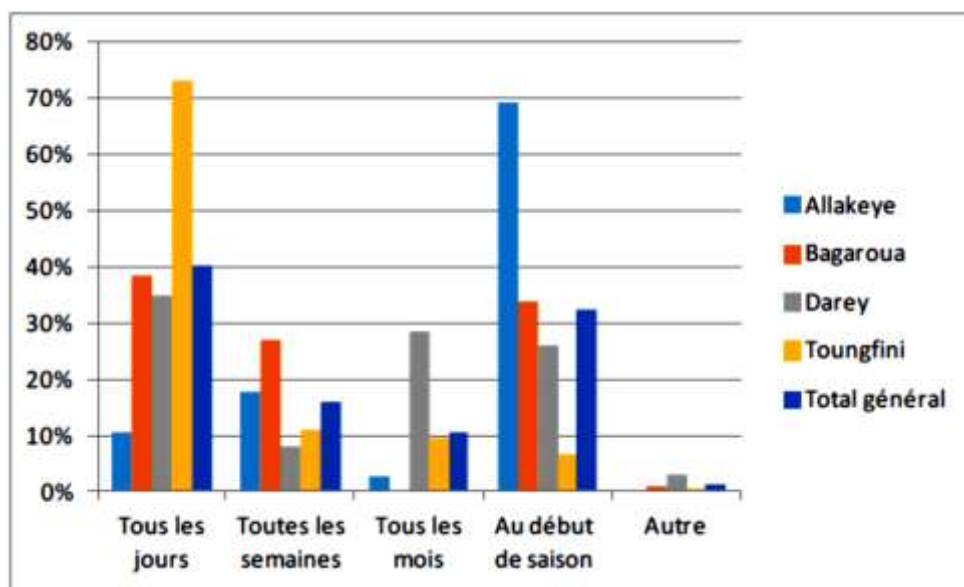


Source : Enquête PAM - IRD - 2017

C'est variable selon les localités, notamment à Allakaye où les besoins sont quasiment équivalents entre le début de la saison et le cumul pluviométrique alors que dans les autres localités de 70 à plus de 80% des répondants souhaitent une prévision du début de la saison. Allakaye semble toujours réticent à l'information climatique car 45% des répondants déclarent ne pas avoir besoin de prévision contre 18%, 12% et 10% respectivement à Darey, Bagaroua et Toungfina.

Une grande proportion de personnes enquêtées exprime le besoin de recevoir de l'information journalière (40% sur les trois localités).

Graphique 7 : Périodicité à laquelle les chefs de ménage souhaiteraient recevoir de l'information climatique



Source : Enquête PAM - IRD - 2017



**La prévision à court-terme intéresse davantage (39% des personnes interrogées) que la prévision saisonnière (28%).** Les répondants restent très intéressés par la prévision au début de la saison (28%) mais n'expriment aucun intérêt pour les autres prévisions (à 10 ans et plus).

Quelle est l'analyse faites des indicateurs traditionnels pour la prévision saisonnière ?

---

## **Recommandations sur les services climatiques**

- **Prendre en compte l'échelle régionale** : il apparaît important de confronter l'analyse de perception locale du changement climatique à une climatologie de référence établie à l'échelle régionale et non locale pour les raisons suivantes : (i) difficulté d'obtenir de la donnée locale à l'échelle de chaque village, (ii) la forte variabilité des précipitations à l'échelle locale qui rend difficile l'extraction d'une tendance climatique et qui limite la représentativité climatologique d'une station en particulier.
  - **Prendre en compte les répercussions du réchauffement climatique** : Les populations interrogées sont plus interpellées par les précipitations que par la chaleur. Cependant, on observe un fort réchauffement climatique au printemps (période déjà la plus chaude de l'année), qui conduit à des températures plus élevées en moyenne et à des épisodes de chaleur de plus en plus sévères.
  - **Prendre en compte le risque de sécheresse et d'inondation** : La sécheresse reste le risque climatique le plus redouté à juste titre compte tenu de la diminution de la durée de la saison des pluies et de la persistance des séquences sèches au cours de la saison. Les populations interrogées semblent pour l'heure moins sensible aux extrêmes pluviométriques. Il existe cependant une tendance à la hausse effective des pluies intenses. Il est certainement nécessaire de prendre en considération le risque aléatoire de pluies intenses, d'inondation et destruction de cultures qui pourraient les accompagner, dans la définition des stratégies d'adaptation au changement climatique.
  - **Prévoir le début de la saison des pluies** : La variable qui intéresse le plus les populations semble être la date de début de la saison des pluies. Le développement de services climatiques dans la région devra proposer ce produit aux utilisateurs.
  - **S'appuyer sur les radios publiques et privées** : Une grande partie de l'information météorologique parvient aux populations par le biais de la radio. Le développement de services climatiques devra s'appuyer sur ce moyen de communication.
  - **Travailler sur une meilleure connaissance** de l'information météorologique : Une des limites dans les services climatiques s'avère être un manque de confiance dans l'information météorologique. Un travail spécifique auprès de certaines populations devra être fait pour améliorer leur connaissance critique des informations météorologiques existantes, incluant l'éducation, la formation afin de les intégrer à d'autres éléments tels que les méthodes traditionnelles et savoirs locaux dans la prise de décision.
  - **Développer les stratégies de réponse** : Même lorsque les populations reçoivent l'information climatique et en perçoivent l'utilité, elles ne sont pas toutes en mesure de mettre en place des stratégies de réponse adaptées. L'information météorologique devrait s'accompagner de moyens pour développer des stratégies de réponses comme la distribution d'intrants, de semences adaptées et de conseils agronomiques.
-

## Références

- Affholder F. (1997) Empirically modeling the interaction between intensification and climatic risk in semi-arid regions. *Field Crops Research*, 52, 79-93.
- CGIAR – Consultative Group on International Agricultural Research (2009) *Climate, agriculture and food security: A strategy for change*. Alliance of the CGIAR Centers.
- de Rouw A. (2003) Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel, *Agric. Syst.*, 81, 73-93.
- Hansen, J.W. (2002) Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74, 309-330.
- Ingram, K.T., M.C. Roncoli, and P.H. Kirshen (2002) Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74, 331-349.
- Luseno, W. K., McPeak, J. G., Barrett, C. B., Little, P. D., et Gebru, G. (2003) Assessing the Value of Climate Forecast Information for Pastoralists: Evidence from Southern Ethiopia and Northern Kenya. *World Development*, 31, 1477-1494.
- Meza, F.J., Hansen, J.W., and D. Osgood (2008) Economic Value of Seasonal Climate Forecasts for Agriculture: Review of Ex-Ante Assessments and Recommendations for Future Research. *J. App. Meteorol.*, 47, 1269-1286.
- O'Brien, K., Sygna, L., Næss, L. O., Kingamkono, R., et Hochobeb, B. (2000) Is Information Enough? User Responses to Seasonal Climate Forecasts in Southern Africa, 1-72 pp.
- Patt, A., Suarez, P., et Gwata, C. (2005) Effects of seasonal climate forecasts and participatory workshops among subsistence farmers in Zimbabwe. *PNAS*, 102, 12623-12628.
- Roncoli, C., Jost, C., Kirshen, P., Sanon, M., Ingram, K. T., Woodin, M., Somé, L., Ouattara, F., Sanfo, B. J., Sia, C., Yaka, P., et Hoogenboom, G. (2009) From accessing to assessing forecasts: an end-to-end study of participatory climate forecast dissemination in Burkina Faso (West Africa). *Climatic change*, 92, 433-460.
- Roudier P., Sultan B., Quirion P., Baron C., Alhassane A., Traoré S. and B. Muller (2011) An ex-ante evaluation of seasonal forecasting for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2308.
- Sultan B., B. Barbier, J. Fortilus, S.M. Mbaye and G. Leclerc (2010) Estimating the potential economic value of the seasonal forecasts in West Africa: a long-term ex-ante assessment in Senegal. *Weather, Climate and Society*, 2, 69-87.
- Sultan B., Roudier P., Quirion P. (2013). Les bénéfices de la prévision saisonnière dans l'agriculture en Afrique de l'Ouest. In : Bossuet J. (coord.), Vadez V. (coord.) *Surmonter les défis de l'agriculture en zones sèches*. Sécheresse, 304-313. ISSN 1147-7806
- Roudier P., Muller B., d'Aquino P., Roncoli C., Soumaré M.A., Batté L. and B. Sultan (2014) The Role of Climate Forecasts in Smallholder Agriculture: lessons from participatory research in two communities in Senegal, *Climate Risk Management*, 2, 42-55.
- Roudier P, Alhassane A, Baron C, Louvet S, Sultan B. (2016) Assessing the benefits of weather and seasonal forecasts to millet growers in Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*. 223:168-180.