

# Effets de l'engorgement du sol sur la croissance, le développement et la productivité du maïs

*Elidaa K. DAKU,  
Nadège I. P. DOSSOUMOU,  
Omonlola N. WOROU,  
Seyni SALACK*

## Introduction

L'agriculture en Afrique subsaharienne, caractérisée par une production agricole à 90 % pluviale, est tributaire des conditions météorologiques et reste fortement exposée à la variabilité croissante des précipitations (HANSEN, 2002). En effet, mise à part l'irrégulière distribution intra-saisonnière des précipitations, l'amplitude des fortes pluies a considérablement augmenté dans cette région (TAYLOR *et al.*, 2017 ; SALACK *et al.*, 2018 ; BICHET et DIEDHIOU, 2018). La fréquence et la durée de ces pluies diluviennes ainsi que celles des périodes humides pendant la saison culturale peuvent affecter significativement la croissance et le rendement des cultures, par un engorgement ou un lessivage des nutriments des sols (GORNALL *et al.*, 2010 ; SALACK *et al.*, 2015). De plus, représentant 2 % à 5 % des terres de l'Afrique de l'Ouest (11 à 16 millions d'hectares) (BLEIN *et al.*, 2008), les terres situées en basse altitude ou les bas-fonds sont des zones exposées à une humidité excessive ou à un engorgement des sols. Pourtant, en raison de leur fertilité et de leur capacité à conserver l'humidité, elles sont considérées dans de nombreux projets comme une réponse à la fois à la pression croissante exercée sur les terres non localisées dans les zones de basses altitudes et aux risques de sécheresse en Afrique de l'Ouest (LAVIGNE-DELVILLE *et al.*, 1996), sans toutefois que l'on tienne compte des risques liés à l'excès d'eau. Par exemple, dans le nord du Ghana, où les principales cultures sont le maïs, le mil, le sorgho et le riz, près de 60 % des terres sont exposées à un engorgement fréquent (CAIRNS *et al.*, 2012).

En Afrique de l'Ouest, de 2007 à 2017, le maïs a couvert en moyenne 10,4 millions d'hectares, pour une production moyenne de 17,2 millions de tonnes contre 14,3 millions d'hectares de mil et 13,2 millions d'hectares de sorgho, produisant respectivement 10,5 et 12,2 millions de tonnes (FAOSTAT, 2019). Cependant, la culture est assujettie à des contraintes abiotiques dont les plus signalées dans la région sont la faible fertilité des sols et la sécheresse (BADU-APRAKU et FAKOREDE, 2017). Face à ces contraintes, les bas-fonds semblent constituer une alternative pertinente pour assurer une meilleure production agricole. Malheureusement, la production du maïs sur ces terres est contrainte par l'absence de réserves naturelles d'air dans ses racines. Par conséquent, suite à une diminution progressive de l'oxygène disponible dans le sol, le maïs souffre d'hypoxie (insuffisance en oxygène), suivi d'anoxie (absence d'oxygène) en cas d'une humidité excessive et prolongée du sol (de plus de 3 ou 4 jours). L'hypoxie ou l'anoxie s'accompagnent d'un déséquilibre nutritif pouvant éventuellement causer des dommages irréversibles et des pertes de rendement (DENNIS *et al.*, 2000 ; ZAIDI *et al.*, 2003 ; ZAIDI *et al.*, 2016). Pour certains auteurs, la sensibilité à l'engorgement semble diminuer du semis au stade de l'apparition de la fleur mâle (LIU *et al.*, 2010 ; REN *et al.*, 2014 ; REN *et al.*, 2016 ; TIAN *et al.*, 2019). Le rendement grain peut diminuer de plus de 40 % avec plus de 3 jours d'engorgement (LI *et al.*, 2011). Inondés durant 6 et 9 jours au stade de trois feuilles (v3), les rendements en grain du maïs peuvent respectivement diminuer de 32 % à 35 % et de 64 % à 80 %. L'ampleur de l'effet dû à l'engorgement en eau semble s'accroître avec l'augmentation de la durée de l'engorgement aux stades végétatifs (REN *et al.*, 2014 ; REN *et al.*, 2016 ; TIAN *et al.*, 2019).

Cependant, pour d'autres auteurs, lorsque l'engorgement se produit autour de la période de floraison (avant ou après), le rendement en grain peut être annulé en raison de la réduction de la durée de remplissage du grain (YANG *et al.*, 2016). Récemment, il a été montré qu'une augmentation de l'intensité des précipitations pendant les stades végétatif et reproductif du maïs pouvait entraîner des réductions de rendement respectives de 5 % et 2 %, mais que le taux de perte par stade de croissance dépendait de la variété de maïs ainsi que du système de gestion des cultures utilisé (MTONGORI *et al.*, 2015).

Toutes les conclusions précédentes sont tirées d'expériences conduites soit en pots (JAISWAL et SRIVASTAVA, 2015 ; YANG *et al.*, 2016 ; WANG *et al.*, 2017 ; LI *et al.*, 2018 ; PANOZZO *et al.*, 2019 ; KAUR *et al.*, 2019), soit en lysimètres ou en serres (DUTHION, 1982 ; LIZASO et RITCHIE, 1997 ; ZUGUI *et al.*, 2013) et ne tiennent pas compte des systèmes de production agricole ouest-africains.

De plus, dans la diversité des études réalisées, peu d'expériences sur l'effet de l'engorgement ont été menées en plein champ (REN *et al.*, 2014 ; 2016 ; 2018) et, malheureusement, mis à part des tests réalisés sur différentes phases phénologiques des cultures, ces études ne rendent pas compte des effets cumulés de l'engorgement du sol lorsqu'il survient à plusieurs phases phénologiques du cycle des cultures. Dans ce contexte, ce chapitre présente la réponse spécifique d'un cultivar de maïs ouest-africain aux effets cumulés de l'engorgement du sol (en fonction de différentes conditions d'engorgement naturel) en plein champ, de 2017 à 2018, dans le nord du Ghana.

# Matériel et méthode

## Description du site d'étude

L'étude a été menée pendant deux saisons de culture (2017-2018) sur un site expérimental du projet APTE-21<sup>1</sup>, localisé à Aniabisi, dans la municipalité de Bolgatanga, dans la région nord-est du Ghana (fig. 1). Aniabisi bénéficie d'un climat soudanien caractérisé par une saison des pluies qui s'étend de mai ou juin à septembre ou octobre avec une pluviométrie annuelle variant de 756 à 1 000 mm. Les températures annuelles moyennes varient entre 28 °C et 39 °C. Le sol dans la zone d'étude est constitué de lixisol gleyique sur les 100 premiers cm de sa couche supérieure. Les propriétés gleyiques caractérisent souvent les sols temporairement ou définitivement submergés par les eaux souterraines (KELLER *et al.*, 2013). En particulier à Aniabisi, les sols caractérisés en 2012 jusqu'à une profondeur de 60 cm sont principalement des plinthosols (haut de pente) et des luvisols (bas de pente ou zone de basse altitude) (DANSO, 2015).

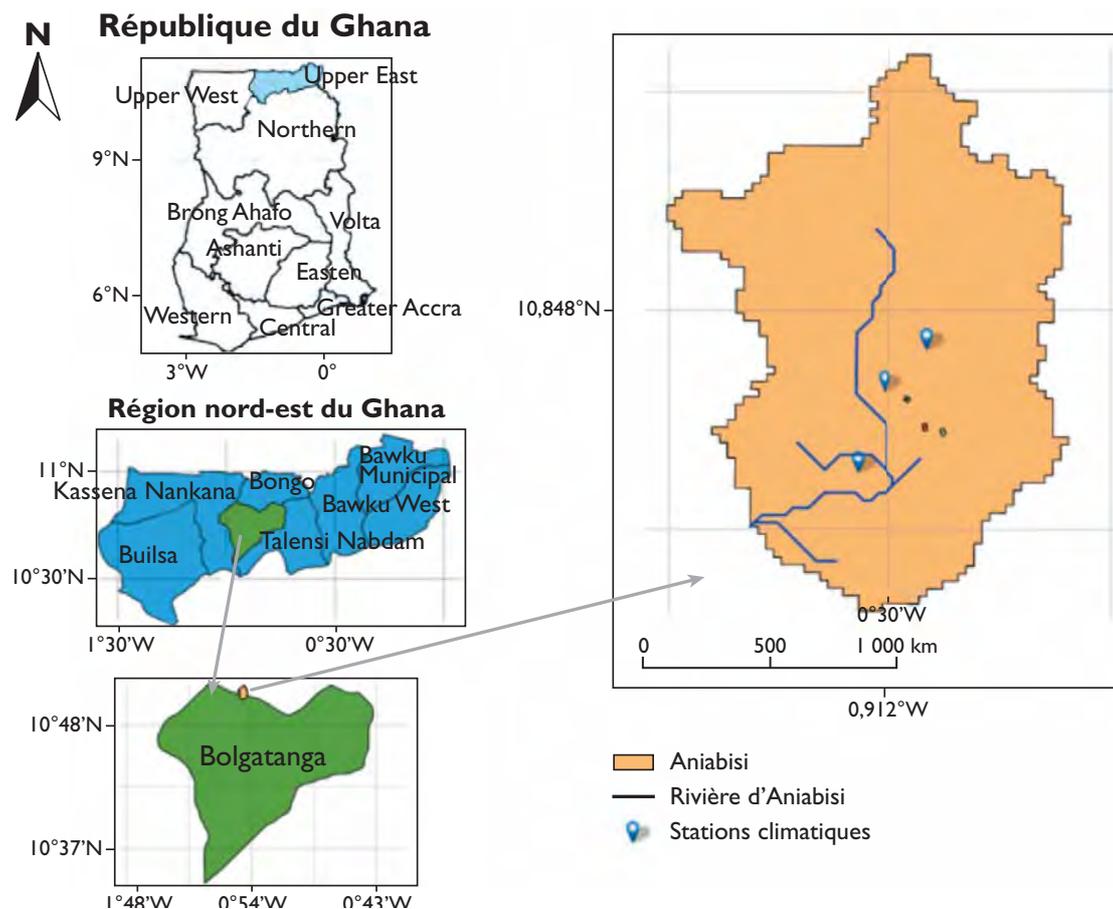


Figure 1.  
Localisation du site expérimental d'Aniabisi.

1. APTE-21 : Applications des prévisions climatiques et pratiques agricoles dans la traduction des événements pluviométriques extrêmes du 21<sup>e</sup> siècle en zones à risques (MEAE/IRD, Agricora axe I, convention 2016–2018).

## Dispositif de collecte des données

Pour la fertilisation minérale, les engrais de type NPK 23-10-5, de l'urée (46 % N) et du sulfate d'ammonium (21 % N) ont été appliqués sur la variété de maïs dénommée « Wang Data ». Il s'agit d'une variété de maïs blanc, tolérante à la sécheresse et au striga (*Striga hermonthica* (Delile) Benth.), développée dès 2012 par l'Institut international d'agriculture tropicale (IITA) en collaboration avec le Centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) et les instituts de recherche sur les cultures de Kumasi et de Tamale (CSIR-CRI Kumasi, CSIR-SARI Tamale), afin d'augmenter la résilience des producteurs de maïs à la sécheresse (SIPALLA et SIPALLA, 2013).

Pour suivre la dynamique du niveau d'eau dans la couche de sol sur 0,30 m de profondeur, des tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) de 0,50 m de hauteur perforés sur 0,30 cm, appelés « *pani pipes* » ont été installés au hasard sur la moitié des parcelles expérimentales (PRITHWIRAJ, 2017).

En 2017 et 2018, les expérimentations ont été mises en place, selon un dispositif expérimental de type split-split-plot avec 3 répétitions. Elles comprenaient : 1) trois positions topographiques (haut de pente, milieu de pente et bas de pente) en tant que source de variation des parcelles principales ; 2) deux types d'aménagement pour la maîtrise de l'eau (la présence de diguette et l'absence de diguette [écoulement normal de l'eau]) en tant que source de variation au niveau des parcelles et 3) deux dates de semis (première et deuxième date de semis) en tant que source de variation au niveau des sous-parcelles. En effet, les parcelles principales étaient localisées en fonction de la topographie du terrain (fig. 2). Ces parcelles principales ont été divisées en deux parcelles (la parcelle bordée de diguettes de 0,3 m de hauteur et la parcelle sans diguettes). Chaque parcelle a été divisée en 6 sous-parcelles (5 m x 6 m), où deux dates de semis ont été répétées 3 fois. Au final, 12 traitements ont été répétés 3 fois, et sont aléatoirement répartis dans 36 sous-parcelles.

Le semis a été fait selon un schéma cultural de 0,75 m entre les interlignes et 0,40 m entre les plantes de la même ligne (VOTO, 2015). Deux semaines après le semis, au démariage, la densité de population a été réduite à 66 667 plants/ha. Les attaques des ravageurs, particulièrement la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*), ont été contrôlées par des pesticides tels que PYRINEXQUICK 424EC (Deltaméthrine, 24 g/l associée à du chlorpyrifoséthylrique (400 g/l) et à l'EMASTAR (benzoate d'emamectine, 20 g/l + Acétamipride, 64 g/l).

## Données collectées et méthodes d'analyse

Au cours des expérimentations, des données météorologiques quotidiennes (radiation solaire, précipitations, températures maximales et minimales, humidité relative, vitesse du vent) ont été collectées par la station météorologique la plus proche (fig. 1). Les paramètres liés à la profondeur quotidienne du niveau de l'eau dans la couche superficielle de 0,30 m ont également été recueillis à l'aide des *pani pipes* installés au centre de chaque parcelle afin d'estimer le facteur de stress hydrique dû à l'excès eau (SEW30). Les valeurs de SEW30 permettent de quantifier les conditions d'excès d'eau du sol en cm.jour comme unité.

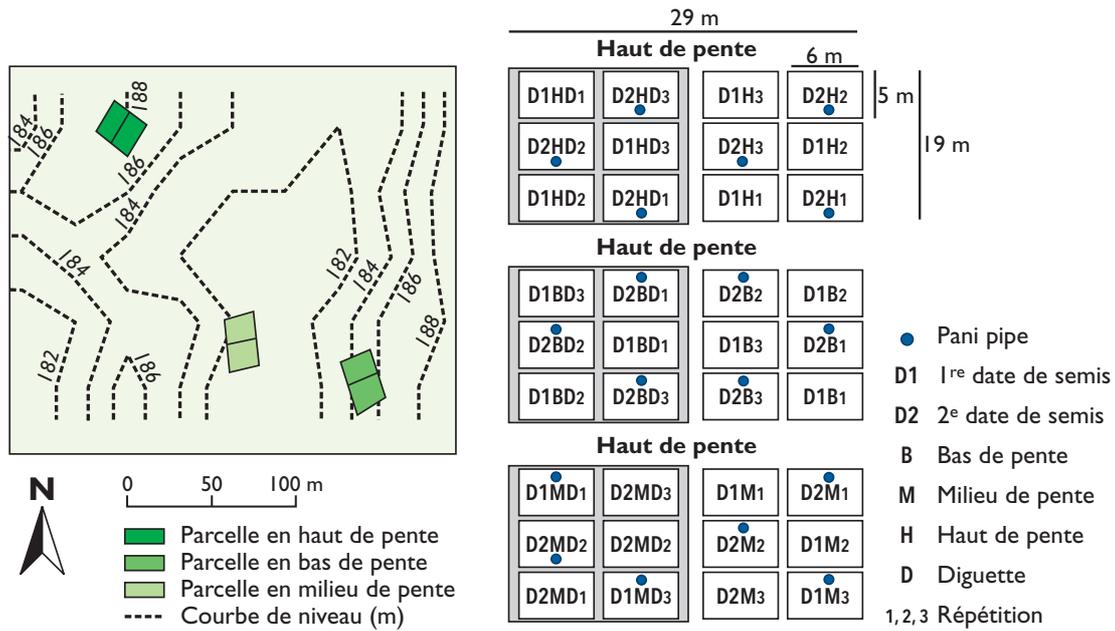


Figure 2.

Détails du dispositif expérimental sur le site d'Aniabisi (Bolgatanga, Ghana).

D1HD1 : Date de semis 1 sur Haut de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D1HD2 : Date de semis 1 sur Haut de pente avec réplication de diguette 2 ;  
 D1HD3 : Date de semis 1 sur Haut de pente avec réplication de diguette 3 ;  
 D1H1 : Date de semis 1 sur Haut de pente sans diguette 1 ;  
 D1H2 : Date de semis 1 sur Haut de pente sans diguette 2 ;  
 D1H3 : Date de semis 1 sur Haut de pente sans réplication de diguette 3 ;  
 D2HD1 : Date de semis 2 sur Haut de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D2HD2 : Date de semis 2 sur Haut de pente avec réplication de diguette 2 ;  
 D2HD3 : Date de semis 2 sur Haut de pente avec réplication de diguette 3 ;  
 D2H1 : Date de semis2 sur Haut de pente sans diguette 1 ;  
 D2H2 : Date de semis2 sur Haut de pente sans diguette 2 ;  
 D2H3 : Date de semis2 sur Haut de pente sans réplication de diguette 3 ;  
 D1MD1 : Date de semis 1 sur le Milieu de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D1MD2 : Date de semis 1 sur le Milieu de pente avec la réplication de diguette 2 ;  
 D1MD3 : Date de semis 1 sur Milieu de pente avec réplication de diguettes 3 ;  
 D1M1 : Date de semis 1 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 1 ;  
 D1M2 : Date de semis 1 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 2 ;  
 D1M3 : Date de semis 1 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 3 ;  
 D2MD1 : Date de semis 2 sur Milieu de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D2MD2 : Date de semis 2 sur Milieu de pente avec réplication de diguette 2 ;  
 D2MD3 : Date de semis 2 sur Milieu de pente avec réplication de diguette 3 ;  
 D2M1 : Date de semis2 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 1 ;  
 D2M2 : Date de semis2 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 2 ;  
 D2M3 : Date de semis 2 sur Milieu de pente sans réplication de diguette 3 ;  
 D1BD1 : Date de semis 1 sur Bas de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D1BD2 : Date de semis 1 sur Bas de pente avec réplication de diguette 2 ;  
 D1BD3 : Date de semis 1 sur Bas de pente avec réplication de diguette 3 ;  
 D1B1 : Date de semis 1 sur Bas de pente sans réplication de diguette 1 ;  
 D1B2 : Date de semis 1 sur Bas de pente sans réplication de diguette 2 ;  
 D1B3 : Date de semis 1 sur Bas de pente sans réplication de diguette 3 ;  
 D2BD1 : Date de semis2 sur Bas de pente avec réplication de diguette 1 ;  
 D2BD2 : Date de semis2 sur Bas de pente avec réplication de diguette 2 ;  
 D2BD3 : Date de semis2 sur Bas de pente avec réplication de diguette 3 ;  
 D2B1 : Date de semis2 sur Bas de pente sans réplication de diguette 1 ;  
 D2B2 : Date de semis2 sur Bas de pente sans réplication de diguette 2 ;  
 D2B3 : Date de semis2 sur Bas de pente sans réplication de diguette 3.

$$SEW30 = \sum_i^n (30 - WTD_i) \quad (\text{KANWAR } et \text{ al.}, 1998)$$

Avec  $WTD_i$  la profondeur journalière de la lame d'eau (en cm) dans la couche superficielle de 0,3 m d'épaisseur et  $n$  représente le nombre de jours.

Mis à part les activités de gestion des cultures (tabl. 1), des mesures liées aux paramètres de croissance et de développement des plantes (hauteur des plants, longueur et largeur des feuilles, nombre de feuilles, masse de la biomasse aérienne) ont été collectées sur un échantillon de 5 plantes aléatoirement réparties par sous-parcelle, tous les 15 jours à partir de 30 jours après le semis (das). Les mesures effectuées sur les feuilles ont été utilisées pour estimer l'indice de surface foliaire (LAI) (REN *et al.*, 2014). Pour la production de biomasse, la biomasse aérienne à 30, 60 et à 90 das a été estimée par un échantillonnage de plants collecté dans des carrés de 1 m x 1 m. À la maturité (R6), les épis des parcelles ont été entièrement récoltés sur chaque parcelle, ainsi que le nombre de plants restant sur chaque parcelle afin d'estimer le rendement en grain. Les épis après récolte ont été séchés au soleil pendant 10 jours avant l'égrenage. L'analyse de la variance des paramètres étudiés et les tests de discrimination des moyennes de Duncan ont été effectués par le package *Agricolae* 1.3-0, avec le logiciel R.

## Résultats

### Dynamique de la lame d'eau et stress hydrique induit

Une analyse de fluctuation du niveau de la lame d'eau dans la couche superficielle de 0,30 m au cours des années expérimentales montre que, en comparaison avec 2017, l'expérimentation a été davantage exposée à l'engorgement du sol en 2018. En termes d'amplitude, la profondeur moyenne du niveau de la lame d'eau par rapport à la surface du sol, observée respectivement sur les parcelles avec et sans diguettes, localisées en bas ou en milieu de pente en 2017 (-9,2 cm ; -13,6 cm ; -16,5 cm ; -20,9 cm) était inférieure aux profondeurs observées au cours de 2018 (+ 6,7 cm ; -1,7 cm ; -4,7 cm ; -6,7 cm) (fig. 3 a et fig. 3 c). De plus, en termes de fréquence, la probabilité d'observer le niveau d'eau dans les 0,15 m de la couche superficielle, en cas de saturation en eau, sur des parcelles avec et sans diguettes, localisées en bas et milieu de pente était en 2017 (58 %, 34 %, 25 %, 4 %) également inférieure à celle observée en 2018 (63 %, 57 %, 45 %, 23 %). En outre, le risque d'exposition à un excès d'eau naturel était très dépendant de l'emplacement topographique des parcelles. En 2017 et 2018, les parcelles en haut de pente ont été significativement moins exposées à l'engorgement que celles situées en bas et milieu de pente. La présence des diguettes par contre a joué son rôle de rétention d'eau, elles ont augmenté le niveau moyen atteint par la lame d'eau ainsi que la durée des phases d'engorgement en 2017 et 2018 (fig. 3 b et fig. 3 d).

En utilisant l'indice relatif à l'excès d'eau (SEW30), les différences en termes de risque d'engorgement apparaissent clairement : le risque d'engorgement sur les

Tableau 1.  
Gestion des parcelles expérimentales d'Aniabisi en 2017 et 2018.

Activités de gestion des cultures	Dates	Caractéristiques
Installation des diguettes	16 juin 2017/19 mai 2018	30 cm de hauteur (manuel)
Labour manuel	17 juin 2017/19 mai 2018	Profondeur 10 cm (Labour manuel)
Premier semis	19 juin 2017/31 mai 2018	66 667 plantes.ha <sup>-1</sup>
Deuxième semis	3 juillet 2017/21 juin 2018	66 667 graines.ha <sup>-1</sup>
Démariage pour les plantes 1 <sup>re</sup> date	03 juillet 2017/13 juin 2018	Réduction manuelle à 2 plantes par trou
Démariage pour les plantes 2 <sup>e</sup> date	17 juillet 2017/7 juillet 2018	Réduction manuelle à 2 plantes par trou
Première fertilisation pour le premier semis 1	7 juillet 2017/20 juin 2018	333,335 kg.ha <sup>-1</sup> de NPK 23-10-5
Deuxième fertilisation pour le premier semis 1	24 juillet 2017/10 juillet 2018	333,335 kg.ha <sup>-1</sup> de NPK 23-10-5
Troisième fertilisation pour le premier semis 1	07 août 2017/27 août 2018	400,002 kg.ha <sup>-1</sup> de silicate d'Aluminium (21 % N)
Première fertilisation pour le premier semis 2	24 juillet 2017/10 juillet 2018	333,335 kg.ha <sup>-1</sup> de NPK 23-10-5
Deuxième fertilisation pour le premier semis 2	07 août 2017/20 juillet 2018	333,335 kg.ha <sup>-1</sup> de NPK 23-10-5
Troisième fertilisation pour le premier semis 2	20 août 2017/07 août 2018 (21 % N)	400,002 kg ha <sup>-1</sup> de silicate d'Aluminium
Premier désherbage manuel	3 juillet 2017/17 juin 2018	Désherbage manuel des premiers semis
Deuxième désherbage manuel	12 juillet 2017/06 juillet 2018	Désherbage manuel sur toutes les parcelles
Troisième désherbage manuel	1 <sup>er</sup> août 2017/27 juillet 2018	Désherbage manuel sur toutes les parcelles
Quatrième désherbage manuel	26 août 2017 /	Désherbage manuel sur toutes les parcelles
Premier désherbage chimique	15 juillet 2017 /	KABAHHERB appliqué à 720g / l
Première lutte antiparasitaire	15 juillet 2017/15 juin 2018	PYRINEXQUICK 424 EC appliqué à raison de 10 ml pour 40 litres d'EMASTAR / 50 ml d'EMASTAR par sac à dos (16 litres), chacun pour chaque parcelle principale.
Deuxième lutte antiparasitaire	3 août 2017/03 juillet 2018	PYRINEXQUICK 424 EC appliqué à raison de 10 ml pour 40 litres d'EMASTAR / 50 ml d'EMASTAR par sac à dos (16 litres), chacun pour chaque parcelle principale.
Troisième lutte antiparasitaire	16 août 2017/30 juillet 2018	PYRINEXQUICK 424 EC appliqué à raison de 10 ml pour 40 litres d'EMASTAR / 50 ml d'EMASTAR par sac à dos (16 litres), chacun pour chaque parcelle principale.
Quatrième lutte antiparasitaire	16 août 2018	50 ml d'EMASTAR par sac à dos (16l) chacun pour chaque parcelle principale
Cinq luttés antiparasitaires	13 août 2018	FORABAT appliqué à 200kg.ha <sup>-1</sup>
Première récolte	19 septembre 2017/13 septembre 2018	Récolte manuelle
Deuxième récolte	03 octobre 2017/20 septembre 2018	Récolte manuelle

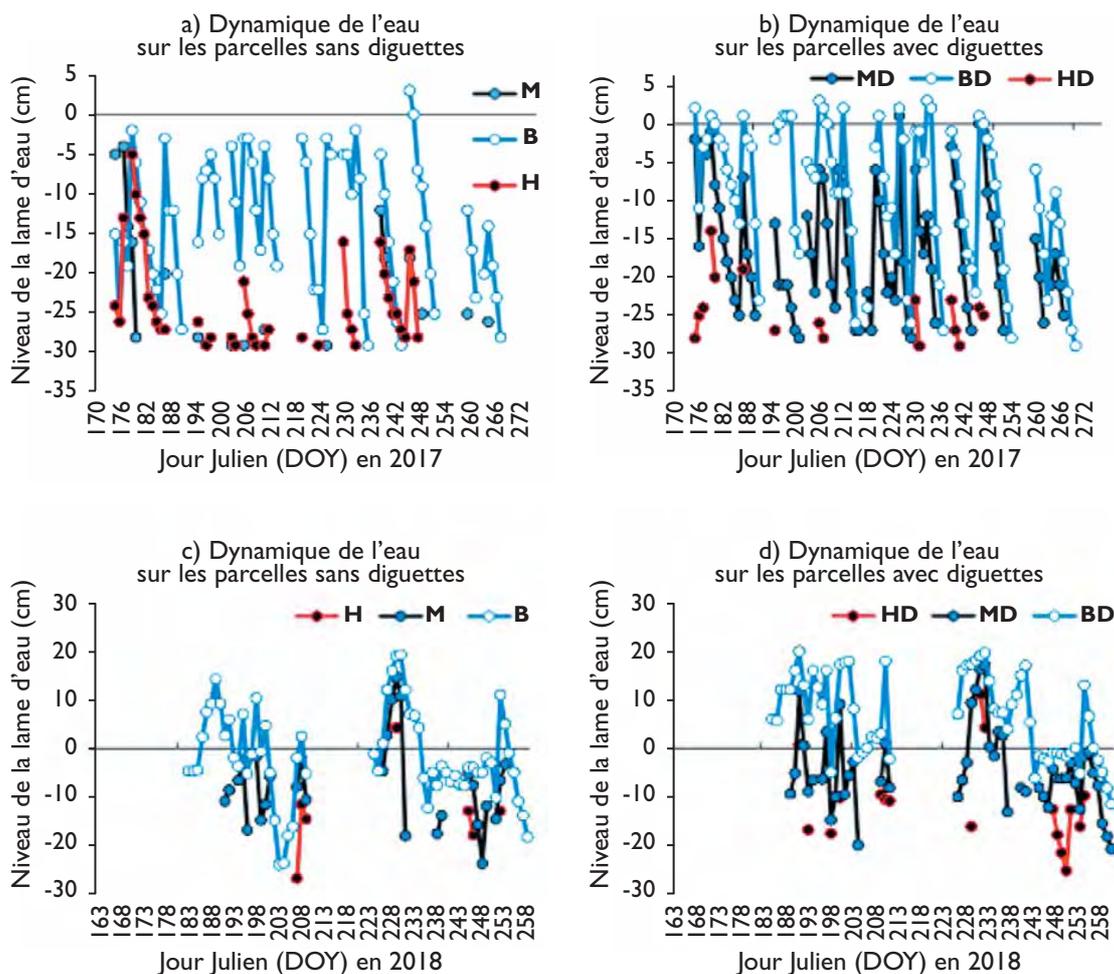


Figure 3.

*Dynamique de la lame d'eau dans la couche superficielle du sol en 2017 et 2018.*

*H : haut de pente ; HD : haut de pente avec diguette ; M : milieu de pente ; MD : milieu de pente avec diguette ; B : bas de pente ; BD : bas de pente avec diguette*

parcelles situées en bas de pente et en milieu de pente sans diguettes comme barrières (173 cm.jour et 1 157 cm.jour en 2017 ; 625 cm.jour et 1 567 cm.jour en 2018) est faible comparativement aux valeurs atteintes sur les parcelles de bas et de milieu de pente avec diguettes au cours des expérimentations (1 011 cm.jour et 1 705 cm.jour en 2017, 1 154 cm.jour et 1 798 cm.jour en 2018) (fig. 4 a et 4 b).

Les résultats ont montré également que le risque d'engorgement variait au cours des phases végétatives (7 – 45 das) et reproductives (46 – 91 das) de la culture en fonction de la date de semis adoptée chaque année. En 2017, les plantes semées à la première date étaient davantage exposées à l'engorgement pendant leur phase végétative que pendant leur phase reproductive. Par contre, semées à la deuxième date, seules les plantes situées en bas de pente avec ou sans diguettes y ont été exposées, lors de leur phase végétative. Celles qui ont été semées en milieu de pente et sur le haut de pente étaient exposées à un risque plus important d'engorgement pendant les stades reproductifs. En 2018, toutes les parcelles de maïs ont connu un risque accru d'engorgement aux stades de la reproduction (fig. 4 c et 4 d).

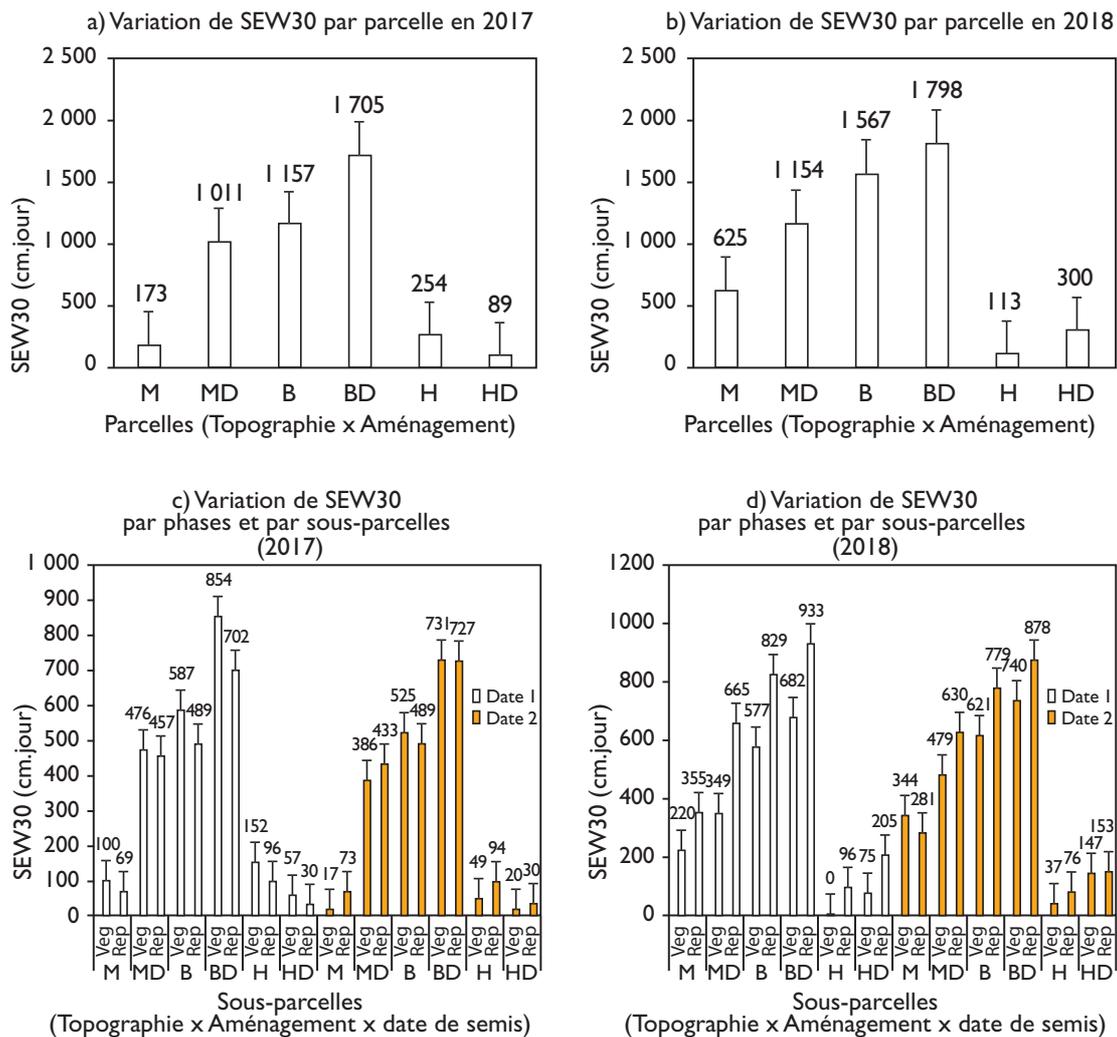


Figure 4.

Variation de SEW30 sur les parcelles et sous-parcelles par phases végétatives (Veg) et reproductives (Rep) en 2017 et 2018.

H : haut de pente ; HD : haut de pente avec diguette ; M : milieu de pente ; MD : milieu de pente avec diguette ; B : bas de pente ; BD : bas de pente avec diguette

## Effets de l'engorgement sur la croissance et le développement du maïs

L'analyse statistique des données de croissance révélait que le nombre de feuilles par plant, la hauteur des plants aussi bien que l'indice foliaire avaient été significativement affectés par la topographie en 2017, mais, au cours de 2018, ce facteur n'affectait significativement le nombre de feuilles et l'indice foliaire que de 60 à 90 das. En 2017, mis à part à 30 das, le type d'aménagement (absence ou présence de diguettes) affectait la hauteur des plants. Le nombre de feuilles et l'indice foliaire ont significativement été affectés de 30 à 60 das par ce facteur. En 2018, la croissance végétative (hauteur des plants) a été fortement affectée par le type d'aménagement de 45 jours à la fin de la saison et le nombre de feuilles et l'indice de surface foliaire ont été modifiés de 75 das à la fin de la saison.

En 2017, la date de semis a affecté le nombre de feuilles à 30 et 60 das. Au 60<sup>e</sup> jour après semis, l'indice de surface foliaire ainsi que la hauteur de la plante à 45 jours étaient affectés par ce facteur. En 2018, la date de semis a affecté de manière significative le nombre de feuilles et l'indice de surface foliaire du 45<sup>e</sup> jour après semis à la fin de la saison. Sur la hauteur de la plante, l'effet n'était pas significatif à partir de 60 das. De plus, les interactions entre « topographie et aménagement » et entre tous les facteurs « topographie, aménagement et date de semis » n'ont eu aucun effet en 2017. En revanche, en 2018, ces interactions ont eu une incidence significative sur le nombre de feuilles et l'indice de surface foliaire à 90 das. Plus précisément, l'interaction de tous les facteurs a également eu un effet significatif sur l'indice foliaire à 60 das et le nombre de feuilles à 75 das.

La date de semis a également interagi avec le type d'aménagement et, en 2017, cette interaction affectait la hauteur de la plante à 60 das, mais, en 2018, la même interaction affectait l'indice de surface foliaire à 30 das, le nombre de feuilles à 75 das et 90 das et affectait également l'indice foliaire à 90 das (tabl. 2). L'interaction entre la date de semis et la topographie a affecté le nombre de feuilles à 45, 75 et 90 das en 2018. En 2017, cette interaction affectait également le nombre de feuilles à 45 et 60 das, mais aussi la hauteur de la plante au 30<sup>e</sup> et 60<sup>e</sup> das.

La position en bas de la pente en 2017 a considérablement réduit le nombre de feuilles, l'indice foliaire et la hauteur de la plante au cours du cycle de culture par rapport aux plantes se trouvant en milieu de pente et en haut de pente. En 2017, les paramètres de la culture (le nombre de feuilles, l'indice foliaire et la hauteur de la plante) y ont été respectivement réduits de 41 %, 86 % et 60 % à 45 das par rapport à la position en haut de pente. Mais en 2018, la position en bas de pente a considérablement réduit leur nombre de feuilles à 60 das, de 6 % à 49 %, comparativement au nombre moyen de feuilles observé en haut de pente (tabl. 2).

En comparant avec l'absence de diguettes, la présence de diguettes en 2017 a réduit le nombre de feuilles et l'indice foliaire respectivement de 10 % et 40 % à 30 das. À 45 das, le nombre de feuilles, l'indice foliaire et la hauteur de la plante ont également été réduits de 11 %, 41 % et 23 %. À 60 das, seule la hauteur de la plante a été réduite de 10 % par les diguettes. Cependant, la même analyse effectuée en 2018 a montré que la hauteur de la plante avait été réduite de 10 % à 12 %, à partir de 45 das. Quant au nombre de feuilles et l'indice de surface foliaire, il a diminué de manière significative dans les parcelles comportant des diguettes, de 17 % à 29 % à partir de 75 das.

En ce qui concerne la date de semis, une comparaison des plants de maïs semés à la première date (D1) avec ceux qui ont été semés à la deuxième date de semis (D2) montre que la hauteur de la plante a été réduite de 18 % à 45 das en 2017. La même année, le nombre de feuilles et l'indice foliaire des plants semés à D1 ont été réduits respectivement de 8 % et 22 % à 60 das.

En 2018, le nombre de feuilles et l'indice foliaire des plantes semées à D2 ont considérablement été réduits de 10 % à 19 % à la fin du cycle de culture pour ce qui concerne le nombre de feuilles, et de 12 % à 49 % à la fin du cycle de culture dans le cas de l'indice foliaire. Le retard dans la croissance en hauteur des plantes semées

à D2 par contre est passé de 45 das à 60 das de 30 % et 6 % comparativement à la hauteur de plantes semées à D1 (tabl. 2).

### Effet de l'engorgement du sol sur la biomasse sèche aérienne et le rendement grain du maïs

L'analyse de la variance et test de discrimination des moyennes de Duncan au seuil de 5 % de la biomasse aérienne à 30, 60 et 90 das et sur le rendement en grain du maïs a montré que la biomasse aérienne à 60 et 90 das et le rendement en grain dépendaient significativement de la topographie en 2017 (fig. 5 a et 5 d). En 2018, le rendement grain était également fortement affecté par la topographie, mais à l'inverse de 2017, seule la biomasse aérienne à 30 das avait été affectée par la position topographique (fig. 5 b et 5 d). En 2018, la biomasse sur la parcelle en bas de pente à 30 das a été réduite de manière significative de 21 % par rapport à celles des parcelles localisées en haut de pente. En 2017, les pertes de biomasse sur les parcelles en bas de pente à 60 et 90 das par rapport aux parcelles en haut de pente ont été estimées à 78 % et 88 %. Le rendement en grain le plus faible a été obtenu, au cours des deux années expérimentales, en bas de pente (0,39 t/ha en 2017 et 1,112 t/ha en 2018) et par rapport aux rendements en grain les plus élevés sur les parcelles en haut de pente, les pertes de rendement en grain étaient de 91 % et 62 % en 2017 et 2018. Les diguettes ont considérablement réduit l'accumulation de biomasse sèche durant le cycle de culture en 2017 mais n'ont eu aucun effet sur la biomasse en 2018. La biomasse à 60 das était très sensible à la date de semis adoptée en 2017 et 2018. La deuxième date de semis avait presque doublé la biomasse à 60 das par rapport à la première date de semis en 2017. De plus, le rendement en grain avait été augmenté de 64 % pour les semis ayant été effectués à la deuxième date. À l'inverse, en 2018, la deuxième date de semis avait réduit significativement de 25 % la biomasse à 60 jours, mais n'a eu aucune incidence sur le rendement grain (fig. 5 c).

L'interaction entre la date de semis et la topographie a également affecté de manière significative la biomasse à 60 das et le rendement en grain en 2017. La biomasse à 60 das et le rendement en grain ont été considérablement réduits ou annulés sur les parcelles situées en bas de pente aussi bien pour la D1 que pour la D2. En 2017, le type d'aménagement et la date de semis ont également interagi et ont affecté le rendement en grain. Les diguettes installées pour le maïs semé à D1 avaient réduit le rendement à 1,7 t.ha<sup>-1</sup>, mais les diguettes installées pour le maïs semé à D2 avaient augmenté le rendement en grain à 4,1 t.ha<sup>-1</sup>.

Des corrélations négatives linéaires et logarithmiques entre le rendement grain et le stress dû à l'excès d'eau (SEW30) ont été déterminées avec des degrés de corrélation variant en fonction des années d'expérimentation et en fonction des phases (fig. 6). En 2017, les degrés de corrélation entre SEW30 et le rendement grain étaient plus élevés que ceux obtenus en 2018 (fig. 6 a et fig. 6 d). Au cours de cette année, plus l'indice SEW30 augmentait, plus le rendement grain du maïs se réduisait suivant une relation logarithmique significative ayant un degré de corrélation de 0,85 lorsqu'on ne considérait que le SEW30 cumulé durant la phase végétative (fig. 6 b). Considérant la phase végétative et reproductive de l'expérimentation

Tableau 2.  
Nombre moyen de feuilles, indice foliaire et hauteur des plants  
à différentes dates après semis au cours de 2017 et 2018.

	30 das		45 das		60 das		75 das		90 das															
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018														
Facteur	nf lai	h lai																						
Topographie																								
Haut																								
de pente	6.6a	0.6a	29.4a	8.5a	1.7a	57.1a	9.7a	2.8a	105.7a	9.1a	2.7a	112a	1.9a	9.4b	2.5a	146.6a	6.6a	1.6a	153a	5.5a	1.2a	164.0a		
Milieu																								
de pente	6.4a	0.5a	26.3a	9.7a	2.1a	53.7a	8.9a	1.9b	90.1a	8.5a	2.0a	93 a	8.9a	2.2a	150a	9.9a	2.5a	142.3a	4.3b	0.9b	147a	2.4b	0.4b	152.5a
Bas																								
de pente	5.0b	0.2b	21.3b	9.1a	1.8a	48.6a	5.7b	0.4c	42.2b	8.6a	2.1a	95a	6.6b	0.6b	65b	8.8c	3.3a	145.2a	4.7b	1.1ab	149a	2.8b	0.6b	156.1a
Aménagement																								
Diguettes	5.7b	0.3b	24.0a	8.7a	1.7a	52.5a	7.6b	1.3b	69.2b	8.4a	2.2a	94b	8.4a	1.5a	116b	9.2a	2.8a	135.5b	4.7b	1.0b	141b	3.4b	0.7b	148.7b
Sans diguettes																								
6.4a	0.5a	27.3a	9.5a	2.0a	53.7a	8.5a	2.2a	89.5a	9.1a	2.3a	105a	8.0a	1.7a	128a	9.6a	2.7a	153.9a	5.7a	1.4a	158a	3.8a	0.8a	166.3a	
Date de semis																								
Date 1	6.3a	0.4a	26.3a	8.7a	1.8a	51.0a	8.3a	1.5a	71.3b	9.5a	2.7a	118a	7.8b	1.4b	119a	10.4a	3.7a	149.6a	5.6a	1.3a	149a	3.8a	0.8a	155.1a
Date 2	5.7b	0.4a	25.0a	9.5a	1.9a	55.2a	7.9a	1.9a	87.5a	8b	1.8b	81.9b	8.5a	1.8a	126a	8.4b	1.9b	139.8b	4.7b	1.1b	150a	3.4b	0.7b	160.0a

nf = nombre moyen de feuilles, lai = indice foliaire moyen, h = hauteur moyenne des plants (cm).  
Les valeurs des paramètres (nombre moyen, indice foliaire ou hauteur moyenne des plants) ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

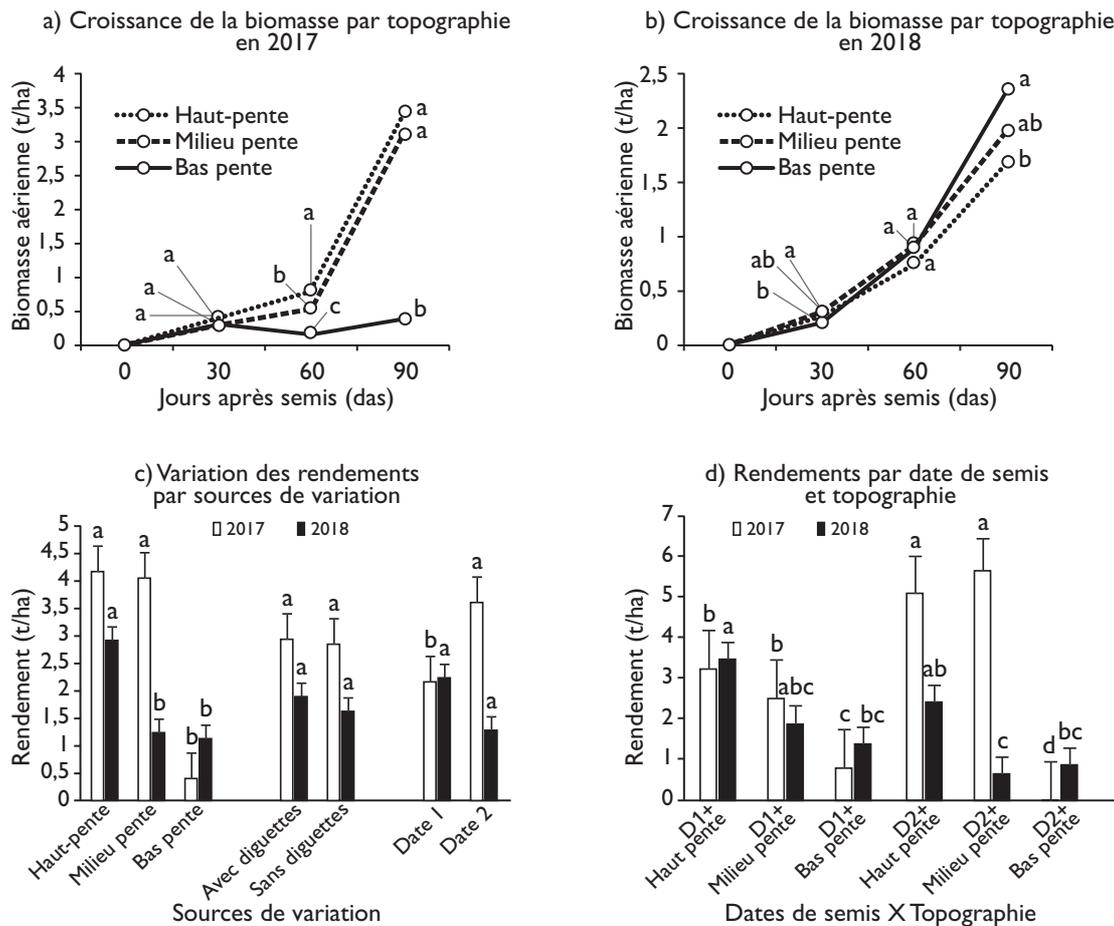


Figure 5.

Croissance de la biomasse aérienne et rendement grain en 2017 et 2018.

menée en 2017, on note une chute considérable du rendement respectivement à partir de 200 cm.jour pour le stade végétatif et 100 cm.jour au stade de reproduction. L'engorgement a donc été une contrainte majeure à la productivité du maïs au cours de cette année 2017, où les risques d'engorgement étaient plus importants pendant la phase végétative que pendant la phase reproductive du maïs (fig. 6 b et 6 c). Par contre en 2018, malgré le risque d'engorgement plus élevé qu'en 2017, les degrés de corrélation entre SEW30 et le rendement grain étaient très faibles comparativement à ceux obtenus en 2017.

## Discussion

Les précédentes études sur l'effet de l'engorgement du sol sur le maïs ont démontré des changements physiologiques de la plante et une baisse du rendement du maïs surtout lorsque l'engorgement survient au stade végétatif (REN *et al.*, 2016 ; TIAN *et al.*, 2019). Cependant, ces études ne tenaient pas compte des agrosystèmes africains

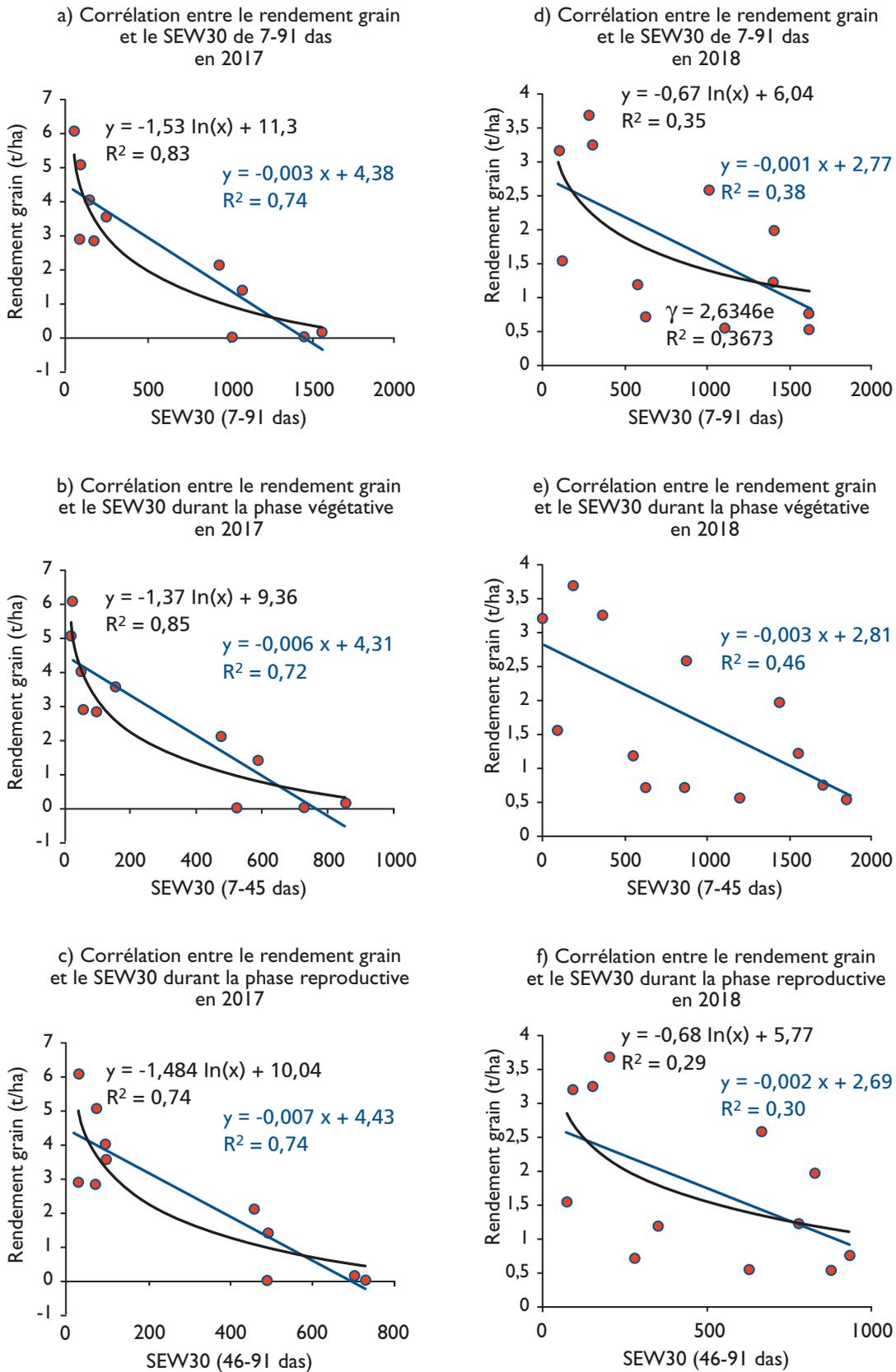


Figure 6. Variation des rendements grain en fonction de l'indice de stress d'excès d'eau SEW30.

dans les zones de basse altitude, qui sont de plus en plus occupées par les producteurs en quête de terre fertile. Malheureusement, le risque d'engorgement dans ces zones est de plus en plus important. Cette étude s'est donc focalisée sur les effets de l'engorgement du sol sur la culture du maïs dans ces zones. Pour ce faire, un essai de maïs a été conduit selon deux dates de semis durant deux années et tout en prenant en compte la topographie et la présence ou non de diguettes. Les parcelles situées en bas de pente sont celles où l'engorgement du sol a été important durant ces deux années. Les diguettes ont permis de conserver l'eau, accentuant ainsi l'engorgement du sol. Les résultats montrent que l'engorgement affecte la croissance et le développement de cette variété de maïs surtout lorsqu'il survient intensément pendant la phase végétative. En effet, lorsqu'elles poussent dans des conditions d'hypoxie ou d'anoxie, les plantes font face à une crise énergétique (KUMAR PATEL *et al.*, 2019) qui nuit gravement à la germination et au développement des plantules aux premières phases phénologiques du maïs (LONE et WARSI, 2009 ; REN *et al.*, 2018), ainsi qu'aux processus de la photosynthèse et de sénescence tout au long du cycle (TIAN *et al.*, 2019). Dans certains cas, l'excès d'eau du sol entraînerait la pourriture des jeunes plants lorsqu'il intervient tôt à la levée des jeunes plants, en provoquant une faible turgescence de la plante et un jaunissement de la feuille qui commence avec une couleur violette de contour (AHMAD *et al.*, 1992). Il a également été démontré qu'avec des nappes d'eau au-dessus de 1,5 m de profondeur, l'influence des eaux souterraines devient négative, probablement en raison de l'engorgement (FLORIO *et al.*, 2014). Cela expliquerait l'arrêt de la croissance de la biomasse observé sur les parcelles de bas de pente en 2017.

Quant au rendement grain, il est considérablement plus réduit et s'annule dans certains cas lorsque l'engorgement survient au stade végétatif du maïs. De plus, lorsque le stress d'excès d'eau intervient à ce stade, la perte de rendement semble suivre une tendance logarithmique en fonction de son intensité, représentée par l'indice SEW30. En effet, il a été démontré que la sensibilité du maïs à l'engorgement semble diminuer du semis au stade de l'apparition de la fleur mâle (MUKHTAR *et al.*, 1990 ; ROSENZWEIG *et al.*, 2002 ; RAO et LI, 2003 ; ZAIDI *et al.*, 2004 ; LIU *et al.*, 2010 ; REN *et al.*, 2016, 2014).

Le stade de l'émergence est le plus susceptible à l'engorgement avec un faible développement, un retard dans le développement de la plante et l'apparition des organes reproducteurs ou l'assèchement complet du jeune plant (LONE et WARSI, 2009). Il a aussi été démontré que les effets négatifs induits par l'engorgement augmentaient quand la durée du stress lié à l'engorgement se prolonge (REN *et al.*, 2014 ; 2016). Une diminution des facteurs de la morphologie (indice foliaire, nombre de feuilles, hauteur) du maïs en cas d'engorgement d'un sol a également été démontrée (LONE et WARSI, 2009 ; REN *et al.*, 2014, 2016).

Par contre, la croissance des plants pourrait avoir été avantagée par la conservation de l'humidité précoce du sol en début de saison. Ce qui expliquerait qu'en 2018, avant que les importantes phases d'inondation ne surviennent pendant les stades reproductifs, la biomasse était beaucoup plus développée sur les parcelles de bas de pente. En effet, en 2013 et 2014, au cours d'expérimentations menées à Dano

(Burkina Faso), le maïs semé en bas de pente enregistrait une meilleure quantité de la biomasse aérienne que celui semé en haut de pente. DANSO (2015), expliquait cela par le fait qu'en condition de stress hydrique sec, le volume de sol est relativement élevé, le rôle de conservation de l'eau et la disponibilité des nutriments en bas de pente avantagent la production de biomasse. En haut de pente, la biomasse avait été réduite par l'avènement de stress hydrique sec (DANSO, 2015).

L'existence d'une corrélation négative entre le rendement en grain et le facteur de stress hydrique (SEW30), surtout lorsque l'engorgement survient en phase végétative, vient confirmer les résultats d'autres chercheurs tels que KANWAR *et al.* (1998). En effet, ils ont démontré que le rendement du maïs est plus affecté par les valeurs du SEW30 au stade floraison et est très peu affecté par les valeurs du SEW30 durant la phase de formation des grains. Des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,71 à 0,85 pour des régressions linéaires et logarithmiques, obtenus entre le stade de levée et le stade végétatif tardif, montraient que le maïs était très sensible durant ces stades à l'excès d'eau tellurique (KANWAR *et al.*, 1998).

De plus, lorsque l'on considère les deux années d'expérimentation, 2017 et 2018, on obtient de meilleurs rendements pour les plants semés à la première date, comparativement aux plants semés à la deuxième date sur les parcelles situées en bas de pente. En haut de pente, c'est le contraire qui prévaut. Sur la base de ces résultats, et du fait que dans les zones de production agricole exposées à l'inondation, FLORIO *et al.* (2014) recommandent des stratégies se basant sur la réduction de la nappe d'eau à une profondeur idéale afin de minimiser l'engorgement, les semis évitant la coïncidence des périodes d'engorgement et des phases végétatives de maïs seraient utiles.

## Conclusion

L'engorgement du sol représente un risque non négligeable, car il impacte de façon significative la croissance, le développement et la productivité du maïs. Compte tenu des résultats obtenus, le semis précoce dans les zones de basse altitude en fonction de la prévision saisonnière relative au début de la saison et aux extrêmes pluviométriques (pluie précoce ou tardive) pourrait permettre de réduire les dégâts et les pertes liés à l'engorgement sur la culture du maïs dans ces zones, en évitant la coïncidence de l'engorgement avec les phases végétatives sensibles de cette culture. Pour ce faire, la mise à disposition de variétés de maïs tolérantes à l'excès d'eau, la mise en place d'infrastructures de drainage et la diffusion de l'information relative au début de saison et à la tendance climatique saisonnière aux producteurs pourraient les aider à mieux s'organiser et tirer profit de leurs activités agricoles, même en zones de basse altitude.

## Remerciements

Nos remerciements au projet « Application des prévisions climatiques et pratiques agricoles dans la traduction des événements pluviométriques extrêmes du XXI<sup>e</sup> siècle en zones inondables – APTE-21 » pour l'encadrement scientifique et le financement de cette étude.

## Références

- AHMAD N., KASPAR T. C., BAILEY T. B., 1992**  
Effect of Soil Surface Submergence and a Water Table on Vegetative Growth and Nutrient Uptake of Corn Effect of Soil Surface Submergence and a Water Table on Vegetative. *Transactions of the ASAE*, 35 : 1173-1177.
- BADU-APRAKU B., FAKOREDE M. A. (éd.), 2017**  
*Advances in Genetic Enhancement of Early and Extra-Early Maize for Sub-Saharan Africa*.  
Gewerbstrasse, Cham, Switzerland, 593 p.
- BICHET A., DIEDHIU A., 2018**  
West African Sahel has become wetter during the last 30 years, but dry spells are shorter and more frequent. *Clim. Res.*, 75 : 155-162.
- BLEIN R., SOULÉ B. G., DUPAIGRE B. F., YÉRIMA B., 2008**  
*Les potentialités agricoles de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO)*.  
Rapport d'étude, Fondation pour l'agriculture et la ruralité dans le monde, 116 p.
- CAIRNS J. E., SONDER K., ZAIDI P. H., VERHULST N., MAHUKU G., BABU R., NAIR S. K., DAS B., GOVAERTS B., VINAYAN M. T., RASHID Z., NOOR J. J., DEVI P., SAN VICENTE F. M., PRASANNA B. M., 2012**  
Maize production in a changing climate : Impacts, adaptation, and mitigation strategies. *Advances in Agronomy*, 114 : 1-58.
- DANSO I., 2015**  
*Soil and water conservation technologies in the West African Sudan Savanna : Cropping system options to address variability of crop yield and impacts of climate change*.  
Thesis doc., Faculty of Agriculture, University of Bonn, 135 p.
- DENNIS S., DOLFERUS R., ELLIS M., RAHMAN M., YU Y., HOEREN F. U., GROVER A., ISMOND K. P., GOOD A. G., PEACOCK W. J., 2000**  
Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. *Journal of Experimental Botany*, 342 (51) : 1-9.
- DUTHION C., 1982**  
Effets d'une courte période d'excès d'eau sur la croissance et la production du maïs. *Agronomie*, 2(2) : 125-132.
- FAOSTAT, 2019**  
<http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FLORIO E. L., MERCAU J. L., JOBBÁGY E. G., NOSETTO M. D., 2014**  
Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agricultural Water Management*, 146 : 75-83.
- GORNALL J., BETTS R., BURKE E., CLARK R., CAMP J., WILLETT K., WILTSHIRE A., 2010**  
Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 365 (1554) : 2973-2989.

**HANSEN J. W., 2002**

Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agric. Syst.*, 74 : 309-330.

**JAISWAL A., SRIVASTAVA J., 2015**

Effect of nitric oxide on some morphological and physiological parameters in maize exposed to waterlogging stress. *African Journal of Agricultural*, 10 (35) : 3462-3471.

**KANWAR R. S., BAKER J. L., MUKHTAR S., 1998**

Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. *American Society of Agricultural Engineers*, 31 (1) : 133-141.

**KAUR G., ZURWELLER B., MOTAVALLI P. P., NELSON K. A., 2019**

Screening Corn Hybrids for Soil Waterlogging Tolerance at an Early Growth Stage. *Agriculture*, 9 (2) : 1-28.

**KELLER A., WEIGHT E., TAYLOR S. (éd.), 2013**

*Rapid assessment of water availability and appropriate technologies for small-scale farming: guidelines for practitioners.* Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute (IWMI), IWMI Working Paper 156, 65 p.

**KUMAR PATEL M., PANDEY S., BURRITT D. J., PHAN TRAN L. S., 2019**

Plant responses to low-oxygen stress: interplay between ROS and NO signaling pathways. *Environmental and Experimental Botany*, 161 : 134-142.

**LAVIGNE-DELVILLE P., BOUCHER L., VIDAL L., 1996**

« Les bas-fonds en Afrique tropicale humide : stratégies paysannes, contraintes agronomiques et aménagements ». In Pichot J. P. (éd.) : *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides*, actes, Montpellier, CIRAD-SAR Éditions : 148-161.

**LI W., MO W., ASHRAF U., LI G., WEN T., ABRAR M., GAO L., LIU J., HU J., 2018**

Evaluation of physiological indices of waterlogging tolerance of different maize varieties in South China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16 (2) : 2059-2072.

**LI X. Y., LIU Z. Y., LI T. X., 2011**

An impact test study of the flood disasters on summer corn's characters and yield. *Acta Meteorol. Sin.*, 31 : 79-82.

**LIU Y., TANG B., ZHENG Y., MA K., XU S., QIU F., 2010**

Screening methods for waterlogging tolerance at maize (*Zea mays* L.) seedling stage. *Agric. Sci. China*, 9 (3) : 362-369.

**LIZASO J. I., RITCHIE J., 1997**

Maize Shoot and Root Response to Root Zone Saturation during Vegetative Growth. *Agronomy journal*, 89 (1) : 125-134.

**LONE A. A., WARSI M. Z., 2009**

Response of Maize (*Zea mays* L.) To Excess Soil Moisture (ESM) Tolerance at Different Stages of Life Cycle. *Botany Research International*, 2 (3) : 211-217.

**MTONGORI H. I., STORDAL F., BENESTAD R. E., MOURICE S. K., PEREIRA-FLORESS M. E., JUSTINO F., 2015**

Impacts of climate and farming management on maize yield in southern Tanzania. *African Crop Science Journal*, 23 (4) : 399-417.

**MUKHTAR S., BAKER J. L., KANWAR R. S., 1990**

Corn growth as affected by excess soil water. *Trans. Am. Soc. Agric.*, 33 : 437-442.

**PANOZZO A., DAL CORTIVO C., FERRARI M., VICELLI B., VAROTTO S., VAMERALI T., 2019**

Morphological Changes and Expressions of AOX1A, CYP81D8, and Putative PFP Genes in a Large Set of Commercial Maize Hybrids Under Extreme Waterlogging. *Frontiers in Plant Science*, 10 (62) : 1-14.

**PRITHWIRAJ D., 2017**

Smart water management in rice by IRRI'S cost effective pani-pipe method for sustainable and climatesmart rice development – A short communication. *International Journal of Agriculture*, 9 (17) : 4154-4155.

- RAO R., LI Y. C., 2003**  
Management of flooding effects on growth of vegetable and selected field crops. *Hortic. Technol.*, 610-616.
- REN B., ZHANG J., LI XIA F. X., 2014**  
Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. *Can. J. Plant Sci.*, 94 : 23-31.
- REN B., ZHANG J., DONG S., LIU P., ZHAO B., 2016**  
Effects of Waterlogging on Leaf Mesophyll Cell Ultrastructure and Photosynthetic Characteristics of Summer Maize. *PLoS ONE*, 11 (9) : 1-22.
- REN B., ZHANG J., DONG S., LIU P., ZHAO B., 2018**  
Responses of carbon metabolism and antioxidant system of summer maize to waterlogging at different stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204 (5) : 505-514.
- ROSENZWEIG C., TIBIELLO F., GOLDBERG R., MILLS E., BLOOMFIELD J., 2002**  
Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environ. Change*, 12 : 197-202.
- SALACK S., SALEY I. A., LAWSON Z. N., ZABRE I., DAKU E. K., 2018**  
Scales for rating heavy rainfall events in the West African Sahel. *Weather and climate extremes*, 21 : 36-42.
- SALACK S., SARR B., SANGARE S. K., LY M., SANDA I. S., KUNSTMANN H., 2015**  
Crop-climate ensemble scenarios to improve risk assessment and resilience in the semi-arid regions of West Africa. *Climate research*, 65 : 107-121.
- SIPALLA T. A., SIPALLA F., 2013**  
*DT Maize, A Quarterly Bulletin of the Drought Tolerant Maize for Africa Project. Drought Tolerant Maize for Africa Project. Volume 2 ( 2), CIMMYT, Nairobi, Kenya, 4 p.*
- TAYLOR C. M., BELUSIC D., GUICHARD, F., PARKER D. J., VISCHER T., BOCK O., HARRIS P. P., JANICOT S., KLEIN C., PANTHOU G., 2017**  
Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544 : 475-488.
- TIAN L., LI J., BI W., ZUO S., LI L., LI W., SUN L., 2019**  
Effects of waterlogging stress at different growth stages on the photosynthetic characteristics and grain yield of spring maize (*Zea mays* L.) Under field conditions. *Agricultural Water Management*, 218 : 250-258.
- VOTO, 2015**  
*A complete Curriculum and Guide to maize production in Ghana.* 34 p
- WANG X., DENG Z., ZHANG W., MENG Z., CHANG X., LV M., 2017**  
Effect of Waterlogging Duration at Different Growth Stages on the Growth, Yield and Quality of Cotton. *PLoS ONE*, 12 (1) : e0169029.
- YANG H., HUANG T., DING M., LU D., LU W., 2016**  
Effects of waterlogging around flowering stage on the grain yield and eating properties of fresh waxy maize. *Cereal Chemistry Journal*, 93 (6) : 605-611.
- ZAIDI P. H., RAFIQUE S., RAI P. K., SINGH N. N., SRINIVASAN G., 2004**  
Tolerance to excess moisture in maize (*Zea mays* L.): susceptible crop stages and identification of tolerant genotypes. *Field Crops Research*, 90 : 189-202.
- ZAIDI P. H., RAFIQUE S., SINGH N. N., 2003**  
Response of maize genotypes to excess moisture stress: morphophysiological effects and basis of tolerance. *Eur. J. Agron.*, 19 : 383-399.
- ZAIDI P. H., VINAYAN M. T., SEETHARAM K., 2016**  
*Phenotyping for abiotic stress tolerance in maize - Waterlogging stress. A field manual.* CIMMYT, Hyderabad, India, 33 p.
- ZUGUI L., ZHANDONG L., JUNFU X., JIQIN N., WENJUN G., 2013**  
Waterlogging at seedling and jointing stages inhibits growth and development, reduces yield in summer maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29 (5) : 44-52.