1. Matériels et conditions expérimentales

1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé correspond aux variétés robustes inscrites sur la liste de référence de l'année en cours. Cette liste est disponible sur les sites internet des différents partenaires du groupe de travail « Variétés Robustes ». Chaque variété est caractérisée (maison plant, obtenteur,...) et particulièrement par rapport au groupe d'utilisation (GU) (Tableau 1) et groupe de maturité (GM) (Tableau 2) afin de faciliter l'interprétation des résultats et de limiter les biais liés aux différences de cycle cultural.

La précocité constitue un facteur particulièrement important dans les essais de tolérance au stress hydrique. En effet, la réponse au déficit hydrique dépend fortement du stade de développement de la culture et de la durée du cycle végétatif. Les génotypes présentant des niveaux de maturité contrastés peuvent être exposés à des conditions hydriques différentes au cours de leur développement, ce qui peut conduire à des biais dans la comparaison des performances.

Tableau 1 : Identification de la destination de la variété candidate

GU	Groupe d'utilisation de la variété
1	Variété chair ferme
2	Variété chair tendre
3	Variété frites
4	Variété chips

Tableau 2: Identification de la précocité de la variété candidate

GM	Groupe de maturité de la variété	Nombre de jours moyen de culture (calculé à partir du stade levée)
1	Variété hâtive (arrachage précoce)	< 110 j
2	Variété mi-hâtive (semi-précoce)	110 - 140 j
3	Variété mi-tardive et tardive (semi-tardif)	> 140 j

Lorsque l'essai regroupe des variétés appartenant à différents groupes de maturité, il est recommandé de suivre séparément les groupes précoces, demi-précoces et tardifs lors de l'analyse des résultats. Le déclenchement du stress hydrique doit être réalisé à un stade physiologique comparable entre variétés, idéalement au stade d'initiation des tubercules ou au début de la floraison. Bien que la floraison puisse constituer un repère pratique sur le terrain, elle ne coïncide pas systématiquement avec l'initiation des tubercules et son expression peut varier selon les génotypes.

Dans le cadre d'études approfondies, la durée du cycle peut être estimée à l'aide d'observations régulières du développement de la culture ou de récoltes séquentielles réalisées à différents stades du cycle. Ces observations permettent de mieux caractériser la précocité des génotypes et d'interpréter les différences de comportement observées sous stress hydrique.

L'uniformité du matériel végétal constitue également un critère essentiel pour garantir la qualité de l'expérimentation. Les tubercules-semences utilisés doivent présenter une taille, un état physiologique et une vigueur aussi homogènes que possible. Le suivi du nombre de jours entre la plantation et la levée peut être réalisé afin de tenir compte d'éventuelles différences liées à la dormance ou à l'état physiologique des tubercules lors de l'analyse statistique des résultats.

Des variétés témoins dont la réponse au stress hydrique est documentée dans la littérature et présentant des réponses contrastées au déficit hydrique peuvent être intégrées à l'essai afin de servir de références pour l'évaluation des génotypes étudiés (Cabello et al., 2020). Parmi eux, la variété robuste Tentation a été identifiée comme l'un des génotypes les plus tolérants au stress hydrique dans des conditions contrôlées de serre (Chairi et al., 2025). Les variétés Bintje et Agria, fréquemment utilisées dans les essais agronomiques et les programmes de sélection, constituent également des références pertinentes. Enfin, Acoustic, cultivar moderne évalué pour sa réponse au déficit hydrique (Chairi et al., 2025), peut être intégré au dispositif expérimental.

1.2. Caractérisation du site expérimental

Avant l'installation de l'essai, une caractérisation du site est réalisée.

a. Paramètres du sol

Les propriétés hydriques du sol doivent être déterminées afin d'estimer précisément l'eau disponible pour les plantes (Cabello et al., 2020). Les échantillons de sol doivent être prélevés avant l'installation de l'essai à plusieurs points de la parcelle afin de caractériser l'hétérogénéité spatiale du site. Les analyses sont réalisées selon les méthodes normalisées en vigueur et concerne :

- texture ;
- densité apparente ;
- capacité au champ ;
- point de flétrissement permanent ;
- teneur en matière organique ;
- profondeur exploitable ;
- pH ;
- conductivité électrique.

b. Conditions météorologiques et instrumentation

Une station météorologique doit être installée à proximité de l'essai pour enregistrer la température de l'air, l'humidité relative, les précipitations, le déficit de pression de vapeur, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, le rayonnement photosynthétiquement actif et la température du sol. Les données sont idéalement enregistrées toutes les 15 à 30 minutes.

1.3. Définition des traitements hydriques et suivi de l'alimentation en eau

La caractérisation de la tolérance au stress hydrique repose sur la mise en place de niveaux contrastés de disponibilité en eau permettant d'évaluer la réponse des variétés dans des conditions allant d'une alimentation hydrique optimale à un déficit hydrique marqué. Les traitements hydriques peuvent être définis soit à partir de seuils d'humidité du sol, soit à partir d'un pourcentage de l'évapotranspiration culturale (ETc) lorsque les conditions expérimentales permettent un pilotage précis de l'irrigation.

L'évapotranspiration culturale (ETc) représente la quantité totale d'eau consommée par la culture à travers les processus combinés de transpiration des plantes et d'évaporation du sol. Elle constitue une estimation des besoins en eau de la culture et sert de référence pour le calcul des apports d'irrigation. L'ETc est calculée selon la relation :

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

où :

- **ETc** est l'évapotranspiration culturale (mm jour^{-1}) ;
- **ET_0** est l'évapotranspiration de référence calculée à partir des données météorologiques (température, humidité relative, rayonnement solaire et vitesse du vent), généralement selon l'équation de Penman-Monteith FAO ;
- **Kc** est le coefficient cultural spécifique à la culture et au stade de développement considéré.

Pour la pomme de terre, les coefficients culturaux de référence proposés par Allen et al. (1998) sont :

- **Kc initial (Kcini) = 0,50**, correspondant à la période suivant la plantation lorsque le couvert végétal est encore peu développé ;
- **Kc de mi-saison (Kcmid) = 1,15**, correspondant à la phase de couverture maximale du sol et de forte demande en eau, généralement associée à la tubérisation ;
- **Kc de fin de saison (Kcend) = 0,75**, correspondant à la phase de sénescence et de maturation des tubercules.

Afin de tenir compte de l'évolution progressive du couvert végétal, le coefficient cultural doit être ajusté au cours du cycle cultural sur la base des observations phénologiques (stades BBCH, développement foliaire et couverture du sol). Le calcul de l'ETc permet alors de déterminer les volumes d'eau à appliquer pour chaque traitement hydrique.

À titre indicatif, trois niveaux hydriques peuvent être mis en œuvre :

- **T0 : irrigation optimale (100 % ETc)** ;
- **T1 : stress hydrique modéré (70 % ETc)** ;
- **T2 : stress hydrique sévère (40 % ETc)**.

Conformément aux recommandations présentées précédemment concernant la gestion des groupes de maturité, les traitements de stress hydrique doivent être appliqués à un stade physiologique comparable entre variétés. Ils sont généralement appliqués après l'installation complète des plantes, au stade d'initiation des tubercules ou au début de la floraison, phases reconnues comme particulièrement sensibles au déficit hydrique chez la pomme de terre. Le niveaux de stress est ensuite suivi et ajusté à l'aide des mesures régulières de l'humidité du sol réalisées à différentes profondeurs du profil (0–20 cm, 20–40 cm et 40–60 cm) à l'aide de sondes TDR, de tensiomètres ou de capteurs capacitifs.
Les données météorologiques (température de l'air, humidité relative, précipitations, rayonnement solaire, vitesse du vent et évapotranspiration de référence) sont enregistrées durant toute la période expérimentale afin de documenter l'intensité du déficit hydrique appliqué.

1.4. Design expérimental et traitements

L'évaluation de la tolérance au stress hydrique nécessite la mise en place de dispositifs expérimentaux spécifiques permettant de générer et de contrôler différents niveaux de disponibilité en eau. Le choix du dispositif dépend des objectifs de l'étude, des équipements disponibles et des contraintes du site expérimental. Le déficit hydrique peut être imposé de manière contrôlée au moyen de différents régimes d'irrigation, induit par des dates de plantation contrastées exploitant les variations climatiques naturelles ou encore obtenu grâce à des structures d'exclusion des précipitations telles que les tunnels ou les abris anti-pluie. Les dispositifs présentés dans les sections suivantes constituent des exemples adaptés à ces différents contextes expérimentaux.

Pour chacun de ces dispositifs, le plan expérimental, les facteurs étudiés, le nombre de répétitions et les modalités de randomisation doivent être clairement définis afin de garantir une estimation fiable des effets variétaux et environnementaux. Lorsque le stress hydrique peut être appliqué individuellement à chaque parcelle, un dispositif en blocs complets randomisés est généralement suffisant. En revanche, lorsque l'application des traitements est soumise à des contraintes techniques, telles que l'irrigation par secteurs, rampes ou lignes de goutte-à-goutte, l'utilisation de tunnels ou d'abris anti-pluie, ou encore des dates de plantation différenciées, un dispositif en split-plot est recommandé. Dans ce cas, le facteur le plus difficile à mettre en œuvre est affecté aux parcelles principales, tandis que les variétés sont réparties aléatoirement dans les sous-parcelles. Cette approche permet de prendre en compte les contraintes opérationnelles tout en assurant une estimation correcte de l'erreur expérimentale.

a. Taille des parcelles

Chaque parcelle comprend :

- 25 à 30 plants ;
- répartis sur 2 à 4 lignes ;
- avec un espacement de 75 cm entre rangs et de 30 à 35 cm entre plants.

b. Cas expérimentaux possibles

Les exemples présentés ci-après illustrent plusieurs approches pouvant être utilisées pour évaluer la tolérance des variétés de pomme de terre au stress hydrique. Ces dispositifs peuvent

combiner différents facteurs, notamment les régimes d'irrigation, les dates de plantation, l'utilisation de tunnels ou d'abris anti-pluie ainsi que la répétition des essais sur plusieurs années.

- **Cas 1 : Variétés x niveaux d'irrigation, avec dispositif en Split-plot design**

Ce dispositif est recommandé lorsque les niveaux d'irrigation sont difficiles à randomiser à petite échelle, car l'eau doit souvent être appliquée par bandes, rampes, lignes de goutte-à-goutte ou secteurs hydrauliques (Hassanpanah, 2010). Dans ce cas, le facteur « irrigation » est placé en parcelles principales, tandis que le facteur « variété » est placé en sous-parcelles.

Structure du dispositif

- Facteur principal : niveaux d'irrigation ou régimes hydriques ;
- Facteur secondaire : variétés ou génotypes de pomme de terre ;
- Répétitions : 3 à 4 blocs ;
- Randomisation : les niveaux d'irrigation sont randomisés dans chaque bloc, puis les variétés sont randomisées à l'intérieur de chaque parcelle principale ;
- Unité expérimentale pour l'irrigation : parcelle principale ;
- Unité expérimentale pour les variétés : sous-parcelle variétale.

Mise en œuvre pratique

L'irrigation est assurée à l'aide d'un système contrôlé, tel qu'un dispositif de goutte-à-goutte ou d'aspersion, permettant d'appliquer précisément les volumes d'eau correspondant à chacun des traitements. Les apports sont ajustés tout au long de l'essai en fonction des niveaux hydriques définis expérimentalement et des besoins de la culture. Pour chaque irrigation, la date, la durée, le débit, le volume appliqué, la pression du système et le traitement concerné doivent être enregistrés.

Exemple de traitements hydriques

Hassanpanah, (2010) a évalué sept cultivars de pomme de terre dans un dispositif en split-plot avec trois répétitions. Les traitements d'irrigation étaient appliqués en parcelles principales et les cultivars en sous-parcelles. Les trois niveaux hydriques étaient définis selon le pourcentage d'épuisement de l'eau disponible du sol :

- T0 : irrigation normale après 25 % d'épuisement de l'eau disponible ;
- T1 : stress modéré après 35 % d'épuisement de l'eau disponible ;
- T2 : stress sévère après 50 % d'épuisement de l'eau disponible.

Dans le présent protocole, ces niveaux peuvent aussi être définis à partir des niveaux hydriques décrits précédemment et exprimés en pourcentage de ETc :

- T0 : irrigation optimale (100 % ETc) ;
- T1 : stress modéré (70 % ETc) ;

- T2 : stress sévère (40 % ETc).

- **Cas 2 : Utilisation de tunnels**

L'utilisation de tunnels ou d'abris anti-pluie constitue un dispositif expérimental permettant de contrôler de manière fine l'apport en eau et de simuler un stress hydrique en conditions de plein champ. Ce système est particulièrement adapté à l'évaluation des variétés robustes de pomme de terre, car il permet d'exclure les précipitations naturelles tout en maintenant des conditions de croissance proches de celles du plein champ.

-



Exemple d'utilisation des tunnels, essai Libramont

Structure du dispositif

- Plan expérimental : blocs complets randomisés ou split-plot ;
- Facteur principal : régime hydrique (tunnel vs témoin extérieur) ;
- Facteur secondaire : variété ;
- Répétitions : minimum 3 blocs ;
- Unité expérimentale : parcelle située sous tunnel ou en condition témoin.

Lorsque plusieurs tunnels couvrent chacun une zone entière, le facteur « tunnel » doit être considéré comme parcelle principale dans un dispositif en split-plot. Lorsque chaque parcelle peut être couverte individuellement, un plan en blocs complets randomisés est suffisant.

Installation et suivi des tunnels

Le dispositif repose sur l'installation de structures légères recouvertes d'un matériau imperméable et transparent (polyéthylène ou polycarbonate) au-dessus des parcelles expérimentales. Ces tunnels sont mis en place avant le déclenchement du stress hydrique afin d'exclure les précipitations naturelles et de limiter les infiltrations d'eau dans le sol. Les côtés peuvent être ouverts ou semi-ouverts afin de réduire les risques de surchauffe et d'assurer une ventilation suffisante.

Les tunnels ou abris anti-pluie doivent être installés avant le début de la période de stress. Leur intégrité ainsi que leur capacité à exclure efficacement les précipitations doivent être vérifiées

régulièrement tout au long de l'essai. Lorsque cela est possible, la température et l'humidité relative sous abri sont également enregistrées afin de caractériser l'éventuel effet du tunnel sur le microclimat. Ce type de système permet une réduction progressive de l'humidité du sol tout en maintenant une forte reproductibilité entre répétitions lorsque les parcelles sont correctement isolées hydrauliquement.

Les parcelles témoins situées hors tunnel sont généralement conduites dans les conditions de culture habituelles du site expérimental. Lorsque les précipitations sont suffisantes pour couvrir les besoins de la culture, aucun apport d'irrigation n'est nécessaire. En revanche, lors des périodes de déficit hydrique marqué, une irrigation complémentaire peut être apportée afin de maintenir des conditions hydriques non limitantes et de disposer d'une référence permettant de comparer les effets du stress induit sous tunnel.

Les deux dispositifs précédemment présentés permettent de contrôler directement l'intensité, la durée et le moment d'application du stress hydrique. Ils constituent donc les approches les plus adaptées pour comparer la tolérance variétale au déficit hydrique.

Approches complémentaires

Dans ce qui suit, nous présentons deux autres approches/modèles complémentaires qui, en raison de l'influence de facteurs supplémentaires, donnent plutôt une indication du degré de tolérance à la sécheresse d'une variété.

- **Cas 3 : Date de plantation x variété**

Le dispositif expérimental « date de plantation × variété » repose sur l'exploitation des variations climatiques naturelles afin de générer des niveaux contrastés de disponibilité en eau au cours du cycle cultural. En l'absence d'irrigation, les différences observées entre les dates de plantation résultent des variations de la réserve hydrique du sol, des précipitations, de la température et de la demande évaporative de l'atmosphère. Ce type d'essai est couramment utilisé pour évaluer l'adaptation variétale aux conditions de sécheresse en agriculture pluviale ou à faibles intrants (Monneveux et al., 2013).

Contrairement aux dispositifs reposant sur des régimes d'irrigation contrôlés ou sur l'utilisation de tunnels et d'abris anti-pluie, le stress hydrique est ici généré de manière indirecte par les conditions environnementales naturelles. Les différences observées reflètent donc non seulement les effets du déficit hydrique, mais également ceux d'autres facteurs tels que la température, le rayonnement ou la durée du cycle cultural. Ce dispositif permet ainsi d'évaluer l'adaptation des variétés à différents contextes de production, mais ne constitue pas la méthode la plus précise pour caractériser spécifiquement la tolérance au stress hydrique. Il doit être considéré comme une approche complémentaire aux essais de stress hydrique contrôlé.

Les plantations précoces bénéficient généralement d'une réserve hydrique plus importante dans le sol, de températures plus faibles et de précipitations printanières plus régulières. À l'inverse, les plantations tardives exposent les variétés à une évapotranspiration plus élevée, à des températures plus importantes et à une diminution progressive des réserves en eau du sol durant les phases critiques de tubérisation et de remplissage des tubercules (Trebejo & Midmore, 1990).

Structure du dispositif

- Plan expérimental : split-plot ou blocs complets randomisés selon les contraintes du site ;
- Facteur principal : dates de plantation ;
- Facteur secondaire : variétés ;
- Répétitions : 3 à 4 blocs ;
- Unité expérimentale principale : date de plantation ;
- Unité expérimentale secondaire : parcelle variétale.

Lorsque les dates de plantation sont réalisées à des moments différents sur une même parcelle expérimentale, un dispositif en split-plot est généralement recommandé afin de tenir compte des contraintes opérationnelles liées au calendrier de plantation.

Mise en œuvre pratique

Les dates de plantation doivent être suffisamment espacées afin de générer des différences climatiques mesurables au cours du cycle, notamment en termes de température, de précipitations et de demande évaporative.

Toutes les parcelles sont conduites sans irrigation afin que les différences observées reflètent principalement :

- les conditions climatiques naturelles ;
- la disponibilité en eau du sol ;
- et la capacité intrinsèque des variétés à maintenir leur croissance et leur rendement en situation de déficit hydrique.

Selon le International Potato Center (CIP), la réussite de ce type d'essai doit être accompagné d'un suivi précis des conditions météorologiques et de l'humidité du sol afin de quantifier l'intensité réelle du stress subi par les plantes. Les mesures de température, précipitations, humidité relative, rayonnement solaire et évapotranspiration de référence sont ainsi enregistrées pendant toute la durée de l'expérimentation.

- **Cas 4 : Essai multi-annuel**

Les essais conduits sur plusieurs années permettent d'évaluer la stabilité des performances variétales dans des conditions climatiques contrastées. Ils apportent des informations précieuses sur les interactions génotype × environnement et sur la capacité d'adaptation des variétés à différents contextes pédoclimatiques. Toutefois, en l'absence d'un contrôle direct des conditions hydriques, ils ne permettent pas d'isoler précisément l'effet du déficit hydrique. Ils doivent donc être considérés comme une approche complémentaire aux essais de stress hydrique contrôlé plutôt que comme une méthode spécifique d'évaluation de la tolérance à la sécheresse.

Structure du dispositif

L'essai multi-annuel ne constitue pas un dispositif expérimental distinct, mais correspond à la répétition sur plusieurs années consécutives d'un dispositif préalablement défini. Celui-ci peut prendre la forme :

- d'un plan en blocs complets randomisés ;
- d'un dispositif en split-plot ;
- ou de tout autre plan expérimental adapté aux objectifs de l'étude.

Afin de permettre l'analyse des interactions génotype × environnement, les modalités expérimentales doivent être maintenues aussi constantes que possible d'une année à l'autre, notamment :

- les variétés évaluées ;
- les traitements appliqués ;
- les dates de plantation ;
- les pratiques de conduite culturale.

Pour assurer la comparabilité des résultats, les dates de plantation doivent être maintenues dans une fenêtre temporelle similaire d'une année à l'autre. Une tolérance de ± 3 à 7 jours peut être admise en fonction des conditions météorologiques et de l'état du sol. Lorsque plusieurs dates de plantation sont étudiées, les mêmes fenêtres doivent être reproduites chaque année.

Dans tous les cas, les variétés doivent être comparées à des stades physiologiques équivalents. Lorsque les génotypes appartiennent à des groupes de maturité différents, ceux-ci doivent être suivis et analysés séparément afin de limiter les biais liés à la précocité.

Interprétation des résultats

Dans ce type d'essai, l'intensité du stress hydrique dépend entièrement des conditions climatiques rencontrées au cours de chaque campagne. Certaines années peuvent être caractérisées par des déficits hydriques marqués durant les phases critiques de développement, tandis que d'autres présentent des conditions plus favorables. Cette variabilité permet d'évaluer la stabilité des performances variétales et la plasticité phénotypique des génotypes dans une large gamme d'environnements.

L'analyse des données multi-annuelles permet d'identifier les variétés présentant les meilleures performances moyennes ainsi que celles dont le comportement est le plus stable entre années. Elle constitue également un outil pertinent pour quantifier les interactions génotype × environnement et caractériser l'adaptation des variétés à des contextes climatiques contrastés.

2. Conduite et suivi de l'essai

2.1. Gestion culturale

La fertilisation est définie à partir de l'analyse de sol. Les apports doivent être identiques entre traitements afin que les différences observées soient attribuées au stress hydrique. Les

ravageurs, maladies et adventices sont suivis dans toutes les parcelles. Les interventions phytosanitaires et le désherbage sont appliqués de manière homogène sur l'ensemble de l'essai.

2.2. Suivi de l'installation de la culture

a. Émergence des plants

La levée des plantes constitue un indicateur essentiel pour suivre le nombre de plants effectivement établis par variété, encore vivants et disponibles pour la collecte des données. Elle permet également de prendre en compte l'efficacité de l'émergence dans l'interprétation et la comparaison des résultats. Le suivi de la levée et de l'établissement de chaque plante doit être réalisé jusqu'à ce que toutes les plantes atteignent 30 à 35 jours après la plantation. À partir de 10 jours après plantation (DAP), le champ doit être observé régulièrement jusqu'à 30 DAP. La date de levée doit être enregistrée pour chaque plante selon le génotype, avec des observations effectuées tous les 3 jours.

b. Vigueur

La vigueur de la parcelle est estimée pour chaque variété en tenant compte de son GM. Cette évaluation est réalisée une fois que toutes les plantes d'une même GM ont atteint au moins 50 % de levée. La vigueur est ensuite cotée sur une échelle de 1 à 9, où :

1 correspond à une parcelle ayant la plus faible vigueur,

9 correspond à la parcelle ayant la vigueur la plus élevée.

c. Nombre de tiges par plant

Le nombre de tiges par plant est compté une seule fois avant le buttage. Une mesure ultérieure peut être imprécise en raison des ramifications souterraines. Cette variable est importante car elle est souvent associée au nombre de tubercules et au rendement final.

d. Suivi sanitaire

Avant le stress, l'incidence des maladies est évaluée afin de vérifier que les différences de réponse au stress ne sont pas confondues avec des différences sanitaires initiales. L'incidence est exprimée en pourcentage de plants atteints par parcelle. La sévérité peut être notée sur une échelle de 1 à 9, où 1 correspond à l'absence de symptômes et 9 à une sévérité très forte.

2.3. Déclenchement du stress hydrique

Le stress hydrique doit être déclenché à un stade physiologique comparable entre génotypes, de préférence au buttage ou à l'initiation des tubercules. Lorsque les variétés présentent des précocités différentes, elles doivent être regroupées selon leur GM afin de garantir une comparaison pertinente des réponses au stress.

Selon le dispositif expérimental retenu, plusieurs modalités peuvent être appliquées :

- **Témoin irrigué**, avec maintien d'une alimentation hydrique optimale tout au long du cycle ;
- **Stress terminal**, caractérisé par l'arrêt complet de l'irrigation à partir du stade choisi jusqu'à la récolte ;

- **Modalité de récupération**, avec reprise de l'irrigation après une période définie de stress (généralement 25 à 30 jours) ;
- **Stress modéré ou sévère**, défini sur la base de pourcentages d'ETc ou de seuils d'humidité du sol préalablement établis ;
- **Stress induit sous tunnel anti-pluie**, permettant de contrôler plus précisément les apports d'eau.

À partir de l'initiation du stress, il est nécessaire de continuer le suivi de l'humidité du sol, de la température du sol, de la température de l'air, des volumes d'eau appliqués et des précipitations. Les premiers effets visibles du stress peuvent apparaître environ 10 jours après son initiation, selon la réserve utile du sol et les conditions climatiques.

2.4. Evaluation Post-stress

Les mesures post-stress doivent être réalisées au moins deux fois après l'initiation du stress, avec environ deux semaines d'intervalle lorsque cela est possible. En débutant entre 2 et 6 jours après le début du stress hydrique, sauf indication contraire. Les évaluations telles que le flétrissement dû à la sécheresse, la vigueur des plantes et l'incidence des maladies sont effectuées selon une échelle qualitative. Il est donc recommandé qu'elles soient réalisées par la même personne afin d'éviter des variations dans les notations.

2. 4.1. Paramètres morphologiques et physiologiques à mesurer

a. Hauteur des plantes

La hauteur des plantes est mesurée sur la tige principale à l'aide d'une règle graduée ou d'un mètre ruban. La mesure est réalisée entre la surface du sol et l'extrémité apicale de la plante et est exprimée en centimètres (cm). Les observations sont effectuées une première fois avant l'application du stress hydrique, puis à intervalles réguliers pendant la période de stress, idéalement toutes les deux semaines.

b. Diamètre des tiges

Le diamètre de la tige principale est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse numérique juste au-dessus du premier nœud aérien. Les mesures sont réalisées avant le déclenchement du stress hydrique puis à plusieurs reprises durant la période de stress afin d'évaluer l'effet du déficit hydrique sur la croissance végétative.

c. Surface foliaire des folioles (*Leaflet Area*)

Trois feuilles pleinement développées et représentatives sont prélevées sur chaque plante ou variété sélectionnée avant l'application du stress hydrique puis à deux reprises durant la période de stress. Les prélèvements sont réalisés sur des feuilles de même âge physiologique et dans une position comparable sur la plante.

La surface foliaire est déterminée à l'aide d'un analyseur de surface foliaire ou d'un planimètre électronique. À défaut, elle peut être estimée par analyse d'images numériques. Les feuilles sont alors photographiées sur un fond contrasté avec une échelle de référence, puis analysées à l'aide d'un logiciel de traitement d'images. Les résultats sont exprimés en cm^2.

d. Teneur relative en eau (*Relative Water Content, RWC*)

La teneur relative en eau constitue un indicateur de l'état hydrique des tissus foliaires. Des folioles ou des disques foliaires sont prélevés sur des feuilles pleinement développées, saines et exposées dans une position comparable sur le couvert végétal afin de limiter la variabilité liée à l'âge ou à la taille des feuilles. Les prélèvements sont réalisés de préférence à la même heure de la journée pour l'ensemble des variétés et des traitements.

Immédiatement après le prélèvement, les échantillons sont pesés afin de déterminer la masse fraîche (FW). Ils sont ensuite placés dans de l'eau distillée pendant 4 à 6 heures à l'obscurité afin d'atteindre leur turgescence maximale. Après réhydratation, les échantillons sont délicatement retirés de l'eau et séchés en surface à l'aide d'un papier absorbant sans exercer de pression excessive, puis immédiatement pesés afin de déterminer la masse à turgescence maximale (TW). Les échantillons sont ensuite séchés dans une étuve à 65–80 °C jusqu'à obtention d'une masse constante afin de mesurer la masse sèche (DW).

La teneur relative en eau est calculée selon la formule :

$$RWC(\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100$$

où :

- **FW** = masse fraîche ;
- **TW** = masse à turgescence maximale ;
- **DW** = masse sèche.

e. Surface spécifique foliaire (*Specific Leaf Area, SLA*)

La surface spécifique foliaire est calculée comme le rapport entre la surface foliaire et la masse sèche correspondante :

$$SLA = \frac{\text{Surface foliaire}}{\text{Masse sèche foliaire}}$$

Elle est exprimée en $cm^2\ g^{-1}$ ou en $m^2\ kg^{-1}$ et constitue un indicateur des réponses morphologiques de la plante au déficit hydrique.

f. Couverture du couvert végétal (*Canopy Cover*)

La couverture du couvert végétal correspond à la proportion de la surface du sol recouverte par la végétation. Elle est déterminée à partir d'images acquises par photographie verticale, drone ou capteur de végétation. Les mesures doivent être réalisées dans des conditions standardisées de hauteur, d'angle et d'éclairement afin de garantir leur comparabilité. Les résultats sont exprimés en pourcentage (%) de surface couverte par la végétation.

g. Flétrissement des plantes (*Plant Wilting*)

L'intensité du flétrissement est évaluée visuellement à l'aide d'une échelle de notation de 1 à 9 :

- 1 : absence de flétrissement ;
- 3 : léger enroulement des feuilles ;
- 5 : flétrissement modéré ;
- 7 : flétrissement sévère ;
- 9 : flétrissement extrême ou sénescence avancée.

Les observations sont réalisées de préférence en fin de matinée ou en début d'après-midi lorsque la demande évaporative est élevée.

h. Teneur en chlorophylle

La teneur relative en chlorophylle est mesurée à l'aide d'un chlorophyllomètre portable de type SPAD/HNT. Trois lectures sont réalisées sur trois folioles de la troisième feuille pleinement développée de chaque plante observée. Une mesure est réalisée avant le stress hydrique puis au moins deux mesures pendant la période de stress. Les résultats sont exprimés en unités SPAD/HNT.

i. Indice de végétation normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index, NDVI*)

Le NDVI est mesuré à l'aide d'un capteur portable (type GreenSeeker) ou d'une imagerie multispectrale acquise par drone.

Il est calculé selon la formule :

$$NDVI = \frac{R_{800} - R_{650}}{R_{800} + R_{650}}$$

où :

- **R_{800}** correspond à la réflectance dans le proche infrarouge ;
- **R_{650}** correspond à la réflectance dans le rouge.

Le NDVI constitue un indicateur du développement et de la vigueur du couvert végétal.

j. Dépression de température du couvert (*Canopy Temperature Depression, CTD*)

La dépression de température du couvert est déterminée à l'aide d'une caméra thermique ou d'un thermomètre infrarouge.

Elle est calculée selon :

$$CTD = T_a - T_c$$

où :

- **Ta** est la température de l'air ;
- **Tc** est la température du couvert végétal.

Les mesures sont réalisées entre 9 h 30 et 15 h 30 par temps ensoleillé, en l'absence de vent fort, avec une émissivité réglée à 0,97. Une valeur positive indique un couvert plus frais que l'air ambiant et traduit généralement une meilleure capacité de refroidissement par transpiration.

2.5. Évaluation à la récolte

a. Nombre de plants récoltés

Le nombre de plants effectivement récoltés dans chaque parcelle est enregistré afin de corriger les estimations de rendement en présence de manques à la récolte.

b. Nombre de tubercules par plant et poids frais des tubercules

Tous les tubercules sont comptés pour chaque plant ou parcelle. Un tubercule est considéré comme formé lorsqu'il présente un diamètre au moins deux fois supérieur à celui du stolon auquel il est attaché.

Les tubercules sont ensuite pesés à l'aide d'une balance numérique calibrée et les résultats sont exprimés en grammes ou en kilogrammes par plant ou par parcelle.

c. Biomasse fraîche

Les plantes récoltées sont séparées en deux fractions :

- parties aériennes (feuilles et tiges) ;
- parties souterraines (racines et stolons).

Chaque fraction est placée dans un sac identifié puis pesée afin de déterminer sa biomasse fraîche.

d. Caractéristiques des tubercules

Les tubercules sont évalués selon :

- leur forme ;
- leur calibre ;
- la présence de déformations ;
- les fissures ;
- les défauts physiologiques ;
- les symptômes éventuels de maladies.

Les classes de calibre doivent être définies avant le début de l'essai.

2.6. Évaluation après récolte

a. Biomasse sèche

Les feuilles, tiges, racines et stolons sont séchés dans une étuve à 80 °C pendant 48 heures ou à 65 °C pendant 96 heures jusqu'à obtention d'une masse constante. Les échantillons sont pesés immédiatement après leur sortie de l'étuve afin d'éviter toute réhumidification.

b. Teneur en matière sèche des tubercules

Pour chaque parcelle ou génotype, un échantillon représentatif d'environ 200 g de tubercules est prélevé, découpé en morceaux puis pesé afin de déterminer la masse fraîche (**FWTS**).

Après séchage pendant quatre jours à 80 °C, la masse sèche (**DWTS**) est déterminée.

La teneur en matière sèche est calculée selon :

$$DMC(\%) = \frac{DWTS}{FWTS} \times 100$$

où :

- **FWTS** = masse fraîche de l'échantillon de tubercules ;
- **DWTS** = masse sèche de l'échantillon de tubercules.

c. Poids sec total des tubercules

Le poids sec total des tubercules est estimé selon :

$$TTDW = TTFW \times \frac{DMC}{100}$$

où :

- **TTFW** = poids frais total des tubercules ;
- **DMC** = teneur en matière sèche des tubercules.

2.7. Calcul des indices de tolérance au stress hydrique

a. Biomasse totale sèche (*Total Biomass*)

La biomasse totale sèche est calculée selon :

$$TBDW = TTDW + APDW + RSDW$$

où :

- **TTDW** = poids sec total des tubercules ;
- **APDW** = poids sec des parties aériennes ;
- **RSDW** = poids sec des racines et stolons.

b. Indice de récolte (*Harvest Index*)

L'indice de récolte sec est calculé selon :

$$HI_{dry}(\%) = \frac{TTDW}{TBDW} \times 100$$

Il représente la proportion de biomasse totale allouée à la production de tubercules.

c. Indice de sensibilité à la sécheresse (*Drought Susceptibility Index, DSI*)

$$DSI = \frac{1 - (Y_s/Y_p)}{1 - (Y_{ms}/Y_{mp})}$$

où :

- **Ys** = rendement du génotype sous stress ;
- **Yp** = rendement du génotype en condition non stressée ;
- **Yms** = rendement moyen de l'ensemble des génotypes sous stress ;
- **Ymp** = rendement moyen de l'ensemble des génotypes en condition non stressée.

Une valeur de **DSI < 1** indique une meilleure tolérance relative au déficit hydrique.

d. Indice de tolérance à la sécheresse (*Drought Tolerance Index, DTI*)

$$DTI = \frac{Y_p \times Y_s}{Y_{mp}^2}$$

Un indice DTI élevé indique un génotype capable de maintenir un bon niveau de production dans les deux conditions hydriques.

e. Tolérance (*Tolerance, TOL*)

$$TOL = Y_p - Y_s$$

Une faible valeur de TOL traduit une réduction limitée du rendement sous stress hydrique.

f. Productivité moyenne (*Mean Productivity, MP*)

$$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$$

Cet indice permet d'identifier les génotypes présentant de bonnes performances à la fois en conditions de stress et en conditions favorables.

g. Classement final des génotypes

Le classement final des génotypes repose sur une approche multicritère intégrant :

- le rendement sous stress hydrique ;
- le rendement en condition non limitante ;
- les indices DSI, DTI, TOL et MP ;
- la stabilité observée entre années ou environnements ;

- la vigueur et le maintien du couvert végétal ;
- les variables physiologiques (RWC, SPAD, NDVI et CTD) ;
- la teneur en matière sèche ;
- la qualité et la conformité des tubercules au groupe d'utilisation.

Un génotype est considéré comme prometteur lorsqu'il combine un rendement élevé sous stress, une faible sensibilité au déficit hydrique, une bonne stabilité de performance et une qualité de tubercules adaptée à son groupe d'utilisation.

3. Analyse statistique

Les données seront analysées à l'aide de modèles statistiques adaptés au dispositif expérimental mis en œuvre. Le choix du modèle dépendra de la structure de l'essai, des facteurs étudiés et du nombre d'environnements évalués.

Pour les essais conduits selon un plan en blocs complets randomisés, l'analyse de variance (ANOVA) permettra d'évaluer les effets des variétés, des traitements et de leurs interactions éventuelles. Lorsque le dispositif expérimental est de type split-plot, l'analyse tiendra compte de la structure hiérarchique de l'essai en distinguant les effets associés aux parcelles principales et aux sous-parcelles, ainsi que leurs termes d'erreur respectifs.

Dans le cas des essais Variétés × niveaux d'irrigation (Cas 1) ou des essais utilisant des tunnels ou abris anti-pluie (Cas 2), l'analyse portera principalement sur les effets de la variété, du régime hydrique et de l'interaction variété × régime hydrique. Cette interaction est particulièrement importante puisqu'elle permet d'identifier les différences de comportement variétal en réponse au déficit hydrique.

Pour les dispositifs Date de plantation × variété (Cas 3), l'analyse visera à quantifier les effets des dates de plantation, des variétés et de leur interaction. Les résultats devront toutefois être interprétés avec prudence, les différences observées pouvant résulter à la fois du déficit hydrique et d'autres facteurs environnementaux associés aux dates de plantation (température, rayonnement, durée du cycle, etc.).

Dans le cas des essais multi-annuels (Cas 4), des modèles mixtes sont recommandés afin d'estimer les effets des génotypes, des années, des environnements et des interactions génotype × environnement. Les données de plusieurs années peuvent également être analysées à l'aide d'approches spécifiques telles que les modèles AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) ou les analyses GGE biplot (Genotype plus Genotype × Environment), qui permettent d'évaluer la stabilité et l'adaptation des variétés dans des environnements contrastés.

Les comparaisons de moyennes pourront être réalisées à l'aide de tests multiples appropriés (Tukey, Fisher LSD ou équivalent) au seuil de signification de 5 %. Lorsque cela est pertinent, des analyses de corrélation, de régression ou des analyses multivariées pourront également être

utilisées afin d'étudier les relations entre les variables morphologiques, physiologiques et agronomiques mesurées au cours de l'essai.

4. Recommandations

Dans le cadre de la convention pomme de terre robustes, l'évaluation de la tolérance au stress hydrique des variétés de pomme de terre doit reposer sur des méthodes harmonisées afin de permettre la comparaison des résultats obtenus dans les différents bassins de production de Belgique et du nord de la France. Compte tenu de la variabilité des conditions climatiques régionales, il est recommandé de caractériser précisément les conditions environnementales de chaque site d'essai (sol, climat, humidité du sol et pluviométrie).

Dans les conditions pédoclimatiques de la zone transfrontalière, les précipitations estivales peuvent limiter l'expression régulière du stress hydrique. L'utilisation de tunnels ou d'abris anti-pluie, associée à un système d'irrigation contrôlé et à un suivi de l'humidité du sol par capteurs, est donc fortement recommandée afin de garantir un niveau de stress comparable entre sites et entre années.

Lorsque le stress hydrique est généré naturellement, les essais doivent être répétés sur plusieurs années et, si possible, sur plusieurs sites représentatifs des conditions de production de la région Interreg. Cette approche permet de mieux caractériser la stabilité des performances variétales et les interactions génotype × environnement.

Afin de limiter les biais liés aux différences de cycle cultural, les variétés doivent être regroupées par classes de précocité et comparées à des stades physiologiques similaires. L'intégration de variétés témoins reconnues comme sensibles ou tolérantes au déficit hydrique est également recommandée pour faciliter l'interprétation des résultats.

Références :

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

Cabello, R.; Cevallos, D.; De Souza, J.; Gutiérrez, R.; Farfán, E.; Lozano, F.; Eyzaguirre, R.; Khan, A.; Schafleitner, R.; Bonierbale, M. 2020. Procedures for Standard Evaluation and Data Management of Advanced Potato Clones. Practical Guide to Assessing Potato Clones for Drought Tolerance under Field Conditions. International Cooperators' Guide. International Potato Center, Lima, Peru. DOI: 10.4160/9789290604716.

Cabello, R.; Monneveux, P.; Bonierbale, M.; Khan, M.A. 2014. Heritability of yield components under irrigated and drought conditions in andigenum potatoes. American Journal of Potato Research.

Chairi, F., Lateur, M., & Muhovski, Y. (2025). *Genotypic variation in agronomic and physiological responses of potato cultivars to water stress under greenhouse conditions*. **Frontiers in Plant Science**, 16. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1692962

Deblonde, P.M.K.; Ledent, J.F. 2001. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. European Journal of Agronomy, 14, 31–41.

Easlon, H.M.; Bloom, A.J. 2014. Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. Applications in Plant Sciences, 2, 1400033.

Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Kuo, C.G. Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress. Tainan, Taiwan.

Fischer, R.A.; Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research, 29, 897–912.

Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D.; Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29, 185–212.

Guttieri, M.J.; Stark, J.C.; Brien, K.; Souza, E. 2001. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit. Crop Science, 41, 327–335.

Hassanpanah, D. 2010. Evaluation of Potato Cultivars for Resistance Against Water Deficit Stress Under In Vivo Conditions. Potato Research, 53, 383–392. DOI: 10.1007/s11540-010-9179-5.

Hijmans, R.J. 2003. The effect of climate change on global potato production. American Journal of Potato Research, 80, 271–279.

Khan, M. A., Saravia, D., Munive, S., Lozano, F., Farfan, E., Eyzaguirre, R., & Bonierbale, M. 2015. Multiple QTLs linked to agro-morphological and physiological traits related to drought tolerance in potato. Plant Molecular Biology Reporter, 33(5), 1286–1298. https://doi.org/10.1007/s11105-014-0824-z

Monneveux, P.; Ramírez, D.A.; Pino, M.T. 2013. Drought tolerance in potato: can we learn from drought tolerance research in cereals? Plant Science, 205, 76–86.

Rosielle, A.A.; Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. Crop Science, 21, 943–946.

Zlatev, Z.; Lidon, F.C. 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. Emirates Journal of Food and Agriculture, 24, 57–72.