Introductie

De aardappelziekte, veroorzaakt door de oömyceet *Phytophthora infestans*, blijft wereldwijd de meest destructieve ziekte in de aardappelteelt (Pellé et al., 2005). De ziekte kan leiden tot een snelle ontbladering van de planten, aantasting van de stengels, een aanzienlijke opbrengstvermindering en rot van de knollen, wat zowel de kwaliteit als de kwantiteit van de oogst beïnvloedt. De bestrijding ervan berust voornamelijk op herhaalde toepassingen van fungiciden, met gemiddeld 12 tot 15 behandelingen per seizoen in gematigd vochtige klimaten zoals die van Noordwest-Europa, en tot wel 20 toepassingen in bijzonder natte jaren (Goffart et al., 2022). Ook de biologische landbouw steunt nog sterk op het gebruik van koperhoudende fungiciden (Nechwatal & Zellner, 2015), ondanks hun negatieve effecten op bodemmicro-organismen (Rehman et al., 2019). Het gebruik van koper zal echter geleidelijk worden verminderd en mogelijk op middellange termijn verboden worden, vanwege de milieubelasting en toxiciteit voor de bodem. Dit perspectief onderstreept het belang van de ontwikkeling en evaluatie van zogenaamde “robuuste” rassen die resistent zijn tegen de aardappelziekte, om een duurzame bescherming van gewassen te waarborgen in alle landbouwsystemen.

In deze context is het essentieel om robuuste aardappelrassen in het veld te evalueren. Deze evaluatie heeft tot doel het gedrag van de rassen te observeren onder natuurlijke ziektedruk, om zo een betere rassenkeuze te kunnen maken voor teeltsystemen die minder chemische middelen gebruiken.

Er bestaan al verschillende protocollen om de resistentie van rassen tegen de aardappelziekte te beoordelen, waaronder die ontwikkeld door het CIP (https://www.researchgate.net/publication/263426295_Field_assessment_of_resistance_in_potato_to_Phytophthora_infestans_International_cooperators_guide#fullTextFileContent) of INRAE (https://revue-novae.fr/article/download/9024/43337) of in het kader van de opname van aardappelrassen in de Belgische nationale rassenlijst (https://agriculture.wallonie.be/files/20182/21849/Protocole_Pomme%20de%20terre%20Fr_2022.pdf).

Toch was een meer specifieke harmonisatie op grensoverschrijdend niveau nodig om tegemoet te komen aan de noden van de werkgroep over robuuste rassen (bestaande uit CRA-W, FIWAP, Bio Wallonie, Viaverda, Inagro, Bio Hauts-de-France, FREDON Hauts-de-France, BioForum en Chambre d’agriculture du Nord-Pas-de-Calais) die werd opgericht in het kader van het PROROB-project (Interreg Frankrijk-Wallonië-Vlaanderen).

Dit protocol kadert in een samenwerkingsgerichte en transdisciplinaire aanpak, met als doel een gemeenschappelijk kader te bieden voor de uitvoering van veldproeven. Het heeft tot doel :

- De organisatie en opvolging van proeven vergemakkelijken tussen de partners van het microproject (CRA-W, Inagro, Chambre d’Agriculture du Nord–Pas-de-Calais), en op grotere schaal binnen de werkgroep “robuuste aardappelen”.
- De consistentie van de beoordelingen te waarborgen.
- De vergelijkbaarheid en valorisatie van de resultaten op grensoverschrijdend niveau te verbeteren.

1. Phytophthora infestans :

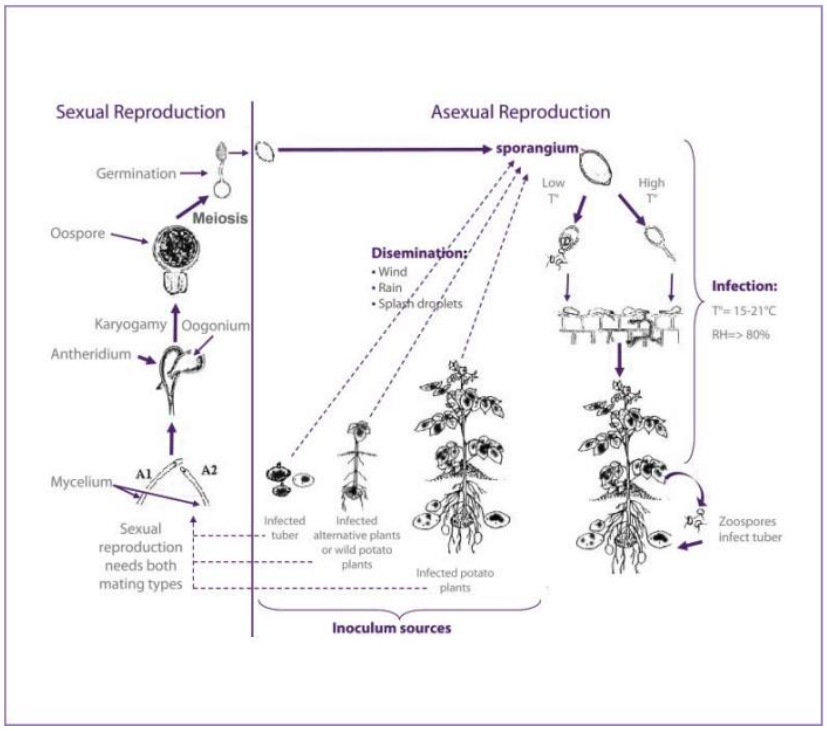
a. Kenmerken van de pathogeen en levenscyclus

Phytophthora infestans is een hemibiotrofe pathogeen met een ontwikkeling in twee fasen. Een biotrofe fase, waarbij levend weefsel wordt gekoloniseerd, en een necrotrofe fase, gekenmerkt door de afbraak van het gekoloniseerde weefsel, wat in korte tijd kan leiden tot de volledige vernietiging van de plant.

Onder gunstige klimatologische omstandigheden — met name een relatieve luchtvochtigheid van meer dan 90% en temperaturen tussen 15 en 22 °C — kan *Phytophthora infestans* meerdere cycli van ongeslachtelijke voortplanting doorlopen (Le Vourch et al., 2025). Het heeft een sterk sporulatiepotentieel, waardoor het zich snel kan verspreiden via sporangia die door de wind worden meegevoerd.(Aylor et al., 2001 ; Fry, 2020). Deze sporangia worden onder vochtige omstandigheden in geïnfecteerd weefsel geproduceerd en vervolgens in de lucht vrijgegeven (Aylor et al., 2001). Ze kunnen minstens 90 meter hoog opstijgen en zich tot 500 meter met de wind mee verplaatsen, en in uitzonderlijke omstandigheden zelfs tot 700 kilometer ver verspreid worden (Aylor et al., 2011 ; Severns et al., 2019).

Nadat ze het weefsel van de waardplant hebben bereikt, kunnen de sporangia mobiele zoösporen vrijgeven of rechtstreeks kiemen na cystevorming. In beide gevallen wordt een kiembuis gevormd die het plantenweefsel binnendringt en de groei van het mycelium op gang brengt (Fry, 2008).

Phytophthora infestans is een heterothallische soort, wat betekent dat voor seksuele voortplanting de aanwezigheid van twee stammen met tegengestelde seksuele types (A1 en A2) vereist is. Dit leidt tot de vorming van oösporen, structuren met een dikke wand die in de bodem kunnen overleven tijdens ongunstige omstandigheden zoals vorst of droogte (Fry, 2020).



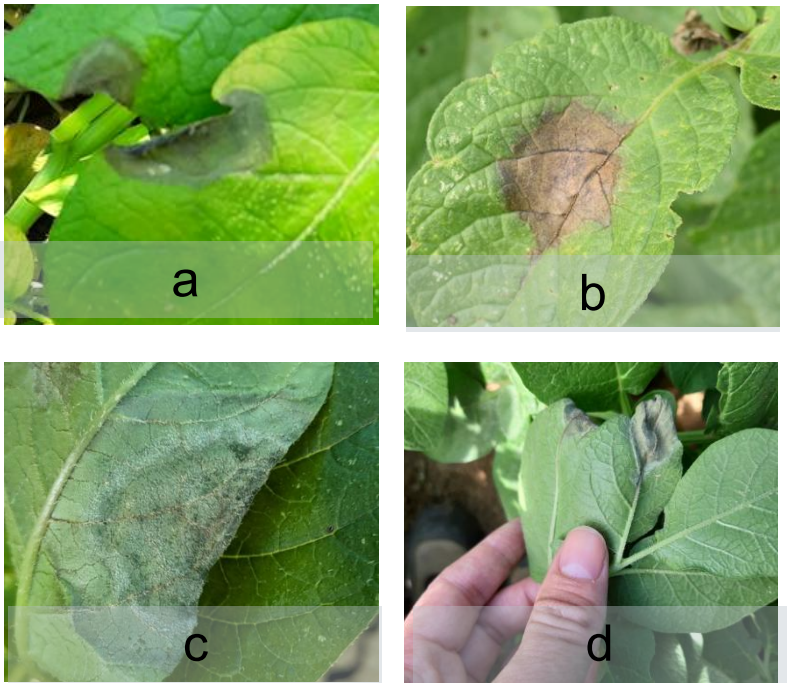
Figuur 1: Levenscyclus van Phytophtora infestans (Bron : CIP (2010))

b. Symptomen :

De symptomen variëren naargelang de ouderdom van de laesie, de omgevingsomstandigheden voorafgaand aan de waarneming en het type weefsel dat is aangetast.

- **Op de bladeren**

De symptomen van de aardappelziekte op bladeren van de aardappelplant verschijnen aanvankelijk in de vorm van onregelmatige, lichtgroene vlekken (Figuur 2a), vaak gelegen aan de randen of uiteinden van de bladeren (Gevens et al., 2013). Deze laesies, die in een zeer vroeg stadium tussen 2 en 10 mm groot zijn, kunnen omgeven zijn door een lichte halo van aangetast maar niet necrotisch groen weefsel. Ze breiden zich snel uit tot grote necrotische vlekken met een donkerbruine tot paarszwarte kleur (Figuur 2b). De laesies ontwikkelen zich meestal in een meer ronde vorm en blijven vaak beperkt tot de bladranden. Ze worden niet altijd begrensd door de nerven, en oudere laesies zijn vaak omgeven door een chlorose-halo (Forbes et al., 2014). 's Ochtends is er op de onderkant van het blad vaak wit schimmelpluis zichtbaar, bestaande uit sporangia en sporen van de pathogeen, vooral rond de randen van de laesies (Figuur 2c en d). Deze schimmelstructuren – sporangia gedragen door sporangioforen – komen via de huidmondjes naar buiten (Yuen, 2021), waardoor de verspreiding van de ziekteverwekker naar andere bladweefsels wordt vergemakkelijkt. Na kieming, hetzij direct, hetzij door het vrijkomen van mobiele zoösporen, kunnen binnen slechts drie tot vier dagen nieuwe laesies ontstaan.



Figuur 2: Symptomen van de aardappelziekte op aardappelbladeren

- **Op de stengels**

De aardappelziekte tast ook de stengels aan, waar ze een insnoering kan veroorzaken die leidt tot verwelking van de bladeren boven de geïnfecteerde zone. Er verschijnen lichtbruine tot donkerbruine laesies op de stengels of bladstelen, die geleidelijk verlengen en soms de stengel volledig omringen (Figuur 3). De aangetaste weefsels worden broos, en de stengel breekt vaak ter hoogte van de laesie (Forbes et al. 2014).



Figuur 3: Symptomen van de aardappelziekte op aardappelstengels

c. Resistentie tegen de aardappelziekte

Bij aardappel zijn twee types resistentie tegen de aardappelziekte beschreven: kwalitatieve resistentie en kwantitatieve resistentie (Rauscher et al., 2010). Kwalitatieve of verticale resistentie berust op resistentiegenen (R-genen) en gaat gepaard met een hypersensitieve reactie die leidt tot celdood, waardoor verdere kolonisatie van het plantenweefsel wordt verhinderd. Kwantitatieve resistentie, ook bekend als horizontale resistentie of veldresistentie, is gebaseerd op meerdere genen die elk een relatief klein effect hebben, maar toch effectief zijn tegen een breed spectrum van *P. infestans*-stammen en stabiel zijn (Brown et Caligari, 2008 ; Sliwka et Zimnoch-Guzowska, 2013).

2. Uitvoering van de proeven ter evaluatie van de resistentie

- Geteste rassen : Alle rassen die opgenomen zijn in de robuuste rassenlijst van het lopende jaar worden getest. De lijst met robuuste rassen is te vinden op de website van elke partner die deel uitmaakt van de werkgroep robuuste aardappelen.

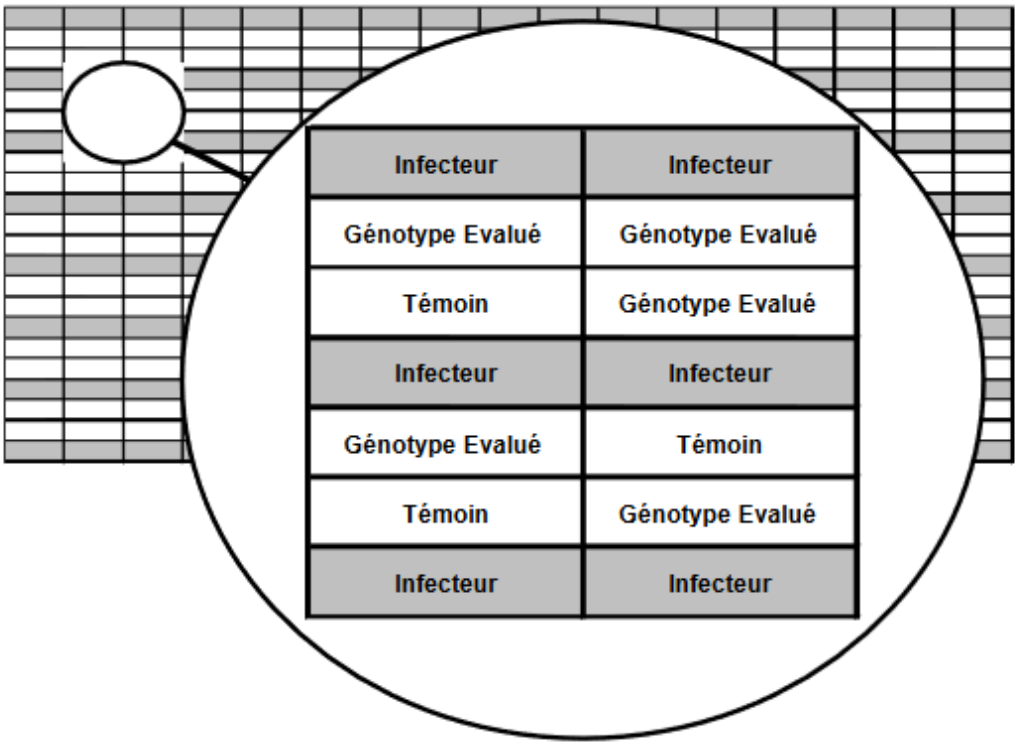
- Referentierassen: Er worden vier referentierassen geselecteerd op basis van hun gevoeligheidsscore voor de aardappelziekte en deze moeten worden opgenomen in de proef, zeker wanneer de proef op verschillende locaties of tijdstippen wordt uitgevoerd (Forbes et al. 2014). De gevoeligheidsscores van de referentierassen worden in oplopende volgorde gekozen; de rassen hebben bij benadering scores van 2, 5, 7 en 9 (van zeer gevoelig tot resistent). De resistentiescores worden hieronder beschreven (

Tabel 1). Bij voorkeur, worden op alle proeflocaties rassen met dezelfde resistentiescores gebruikt. Deze rassen moeten een zekere stabiliteit vertonen in hun reactie op de aardappelziekte en moeten daarom jaarlijks opnieuw worden geëvalueerd om de meest relevante referenties te selecteren.

- Grootte van de percelen: De resistentie tegen de aardappelziekte kan beoordeeld worden in kleine percelen met 25 tot 30 planten.

- Agronomisch beheer: Bemesting, onkruidbestrijding, plaagbeheersing en alle andere landbouwactiviteiten moeten uniform worden uitgevoerd voor alle percelen binnen de proef en in overeenstemming zijn met de lokale praktijken in de biologische landbouw. Om de ontwikkeling van de aardappelziekte te bevorderen, wordt de proef uitgevoerd zonder toepassing van fungiciden, ook niet die op basis van koper.

- Experimentele opzet: De rassen moeten worden geëvalueerd in een proef met herhalingen, waarbij 3 tot 4 herhalingen worden gebruikt. De resistentie tegen de aardappelziekte kan worden beoordeeld met behulp van alle klassieke proefopzetten, zoals een volledig gerandomiseerd ontwerp of een gerandomiseerd blokkenplan (Forbes et al. 2014). De proefplot worden aan beide zijden begrensd door rijen met een gevoelig ras, zoals Bintje, Vitelotte, Agria, enz. (Figuur 5 en 6). Elke herhaling kan bestaan uit 2, 3 of 4 rijen, afhankelijk van de beschikbare oppervlakte.



Figuur 4: Voorbeeld van een experimentele opstelling (Pellé et al., 2005)



Figuur 5 : Rijen van het gevoelige ras Vitelotte aan de rand van de proef en tussen elk proefplot (Proefperceel van Gembloux, 21/07/2021).

De rijen van het gevoelige ras kunnen bepaalde experimentele vertekeningen veroorzaken. Bijvoorbeeld als het ras dat wordt gebruikt zeer gevoelig is voor aardappelziekte, dan kan er een grote hoeveelheid sporangia worden geproduceerd. Daardoor wordt de infectiedruk kunstmatig verhoogd op de aangrenzende percelen. Dit kan de indruk wekken dat de aangrenzende rassen gevoeliger zijn dan ze in werkelijkheid zijn.

Om deze vertekening te beperken, kan men tussen elke testrij planten met een infectie plaatsen. Zo worden alle rassen op een uniforme manier blootgesteld aan het inoculum. Deze methode verdubbelt echter de omvang van de proefopstelling, wat logistieke beperkingen met zich mee kan brengen. Een meer gebalanceerde aanpak bestaat erin ervoor te zorgen dat elke variëteit in de nabijheid van minstens één rij van een gevoelig ras geplaatst wordt. Zo wordt een vergelijkbare blootstelling gegarandeerd, terwijl de omvang van de proef beheersbaar blijft.

3. Karakterisering van de lokale klimaatomstandigheden

De lokale klimaatomstandigheden worden gekarakteriseerd op basis van gegevens die verzameld zijn door een weerstation dat rechtstreeks op het proefveld is geïnstalleerd, of bij gebrek daaraan, op basis van informatie van het dichtstbijzijnde referentiestation. Gegevens over temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en neerslag zijn essentieel om de resultaten met betrekking tot de ontwikkeling van aardappelziekte te interpreteren.

4. Karakterisering van de aanwezige stammen van *Phytophthora infestans*

Het is ook interessant om de aanwezige stammen van *Phytophthora infestans* (verwekker van aardappelziekte) op het perceel te karakteriseren. Deze karakterisering kan gebeuren met behulp van de tools en middelen die beschikbaar zijn via het EuroBlight-netwerk, om de genetische diversiteit en virulentie van de aanwezige stammen te identificeren.

5. Beheer van klimaatomstandigheden om infectie met aardappelziekte te bevorderen binnen het kader van de proef

Bij een klimaat dat ongunstig is voor de ontwikkeling van aardappelziekte, moeten verschillende maatregelen worden genomen om de aanwezigheid van infectie te bevorderen en een adequaat infectieniveau in het proefperceel te behouden. Deze acties zijn erop gericht om omstandigheden

te creëren die gunstig zijn voor de ontwikkeling van de ziekte, zodat de resultaten van de proef betrouwbaar geïnterpreteerd kunnen worden.

a. Vochtigheid

Om een omgeving te creëren die gunstig is voor de ontwikkeling van de aardappelziekte, is het essentieel om een constante vochtigheid in het proefperceel te behouden. Afhankelijk van de beschikbare middelen kan dit gerealiseerd worden via verneveling (het creëren van een waternevel met vernevelaars) of via irrigatie, op voorwaarde dat deze goed gecontroleerd wordt om plaatselijke wateroverlast te vermijden.

Verneveling is bijzonder effectief om een hoge vochtigheid aan het oppervlak van de planten te behouden, zonder de bodem te verzadigen, en onderscheidt zich dus duidelijk van klassieke irrigatie, waarbij in korte tijd een grote hoeveelheid water wordt toegediend. Bij hoge temperaturen wordt aanbevolen om laat te irrigeren (aan het einde van de dag of 's avonds), om verdamping te beperken en de vochtigheid 's nachts te behouden, een periode die gunstig is voor infectie met aardappelziekte.

b. Inoculatie

Inoculatie bestaat uit het opzettelijk introduceren van stammen van de aardappelziekte om infecties in de proefpercelen te bevorderen.

Er kunnen verschillende inoculatiemethoden worden gebruikt:

- **Verneveling van stammen**: deze methode bestaat uit het rechtstreeks vernevelen van aardappelziekte-stammen op de planten.
- **Toevoeging van besmette bladeren**: Aardappelbladeren worden in het laboratorium geïnfecteerd en in het proefperceel ingebracht zodra ze zich in de sporulatiefase bevinden. Ze worden geplaatst op de infectielijnen van de proefpercelen om de verspreiding van de infectie te bevorderen. (*Figure 6*)



Figuur 6: Inoculatie in het veld met bladeren die sporulatie vertonen, vervolgens in een plastic zak geplaatst om een hoge luchtvochtigheid te bevorderen.

Het is van essentieel belang ervoor te zorgen dat de inoculatie geen vertekening in de proef veroorzaakt. De stammen moeten op homogene wijze worden toegepast, zodat bepaalde rassen niet ten koste van andere worden bevoordeeld. Bovendien moet bijzondere aandacht worden besteed aan de voor de inoculatie gebruikte stammen, waarbij ervoor moet worden gezorgd dat deze overeenkomen met de meest recente stammen die in Europa voorkomen.

6. Beoordeling van de ernst van de ziekte en scores

a. Observatiemethode

De ernst van de ziekte wordt beoordeeld door het percentage geïnfecteerd bladoppervlak te schatten. Deze variabele wordt gedurende het hele seizoen opgevolgd, en de datum van elke observatie of beoordeling wordt systematisch geregistreerd.

De gegevens worden verzameld voor elk ras binnen elke herhaling. Deze aanpak maakt het mogelijk om de evolutie van de ziekte nauwkeurig en vergelijkend te volgen tussen de geteste rassen. Het is aan te raden om de observaties ’s ochtends of bij bewolkt weer uit te voeren, zodat de symptomen beter te onderscheiden zijn. Achteraan het document zal een bibliotheek beschikbaar zijn om de observator te helpen bij het herkennen van de verschillende symptomen van aardappelziekte, afhankelijk van hun ontwikkelingsstadium en hun locatie op de plant.

b. Begin en einde van de beoordelingen

De beoordelingen moeten starten zodra de weersomstandigheden gunstig worden voor de ontwikkeling van aardappelziekte. Onderzoekers moeten daarom op de hoogte zijn van de gebruikelijke periode waarin aardappelziekte in hun regio optreedt en/of de omliggende percelen in de gaten houden om de eerste tekenen van infectie te detecteren (Forbes et al., 2014).

Als er symptomen worden waargenomen, moeten de waarnemingen onmiddellijk starten, zodat de evolutie van de ziekte vanaf de eerste stadia gevolgd kan worden. Daarnaast kunnen waarschuwings- of voorspellingssystemen voor aardappelziekte, gebaseerd op weersomstandigheden (temperatuur, luchtvochtigheid, neerslag), gebruikt worden om het optimale startmoment voor de waarnemingen te bepalen, door te anticiperen op periodes met een hoog risico op infectie.

De waarnemingen worden voortgezet tot het blad van het ras volledig is afgestorven, wat het einde markeert van de beoordeling van dat ras.

Tot slot moeten de beoordelingen bij vroege rassen worden stopgezet vóór het begin van de natuurlijke afrijping van de planten, om verwarring te vermijden tussen ziektesymptomen en fysiologische veroudering.

c. Frequentie van de waarnemingen

De beoordelingen worden gebruikt om de oppervlakte onder de ziektetoenamecurve (AUDPC) te berekenen, waardoor vaste tijdsintervallen tussen de waarnemingen niet strikt noodzakelijk zijn. Als de ziekte zich snel ontwikkelt bij gevoelige genotypen, moeten de beoordelingen frequent worden uitgevoerd (om de 3 à 4 dagen). Als de ziekte zich langzaam ontwikkelt, kan het interval tussen de observaties langer zijn (om de 7 à 10 dagen).

d. Beoordelingsschaal

De observaties worden uitgevoerd op percelen van 25 tot 30 planten, met behulp van een beoordelingsschaal van 0 tot 10 (in punten) of van 0 tot 100 (in procent), waarbij:

- 10 punten of 0% staat voor een gezond gewas, zonder symptomen van de aardappelziekte,
- 0 punten of 100% staat voor volledige vernietiging van het gewas door de ziekte.

Tabel 1: Beoordelingsschaal

% Aantasting	Beschrijving	Punten
0	Geen symptomen	**10**
0,01	**1 à 2 blaadjes per perceel** (1 blaadje/10.000 blaadjes)	**9,90**
0,05	**3 à 5 blaadjes per perceel** (of één aangetaste planttop per perceel)	**9,75**
0,1	Ongeveer **10 blaadjes per perceel**. Eerste sporulatie	**9,50**
0,5	Gemiddeld **1 blaadje per aangetaste plant** (ongeveer 25 tot 40 blaadjes per perceel)	**9**
1	Gemiddeld **4 blaadjes per aangetaste plant** (ongeveer 100 blaadjes per perceel). Algemeen lichte infectie	**8**
2,5	Gemiddeld **8 à 10 blaadjes per aangetaste plant** (ongeveer 200 à 250 blaadjes per perceel).	**7**
10	Gemiddeld **1 op de 5 bladeren per plant** aangetast	**6**
25	**25% van het bladoppervlak is aangetast** door aardappelziekte. De vegetatie oogt nog groen. Alle planten vertonen een infectie.	**5**
50	Ongeveer **50% van het bladoppervlak is aangetast**; de algemene kleur van het gewas is groen-bruin.	**4**
75	**75 % van het bladoppervlak is aangetast**, dus er blijft nog 25% groen over.	**3**
95	Nog **enkele groene delen**, met name enkele stengels.	**2**
99	Nog **enkele groene blaadjes**, de stengels worden bruin of sterven af.	**1**
100	**Vegetatie volledig vernietigd.**	**0**

Gebaseerd op: James, C. 1971. A manual of assessment keys for plant diseases. Canada Department of Agriculture. Publication No. 1458

Naast de hele getallen van de beoordelingsschaal kunnen ook tussenwaarden worden gebruikt (bijvoorbeeld: 7,5 of 4,3), om een fijnere en nauwkeurigere beoordeling van de ontwikkeling van de symptomen mogelijk te maken.

Het is belangrijk op te merken dat als op datum n symptomen worden waargenomen (bijv. score = 9), maar op datum n+1 deze symptomen niet meer zichtbaar zijn, dezelfde score als op datum n moet worden aangehouden. Zo wordt een verkeerde interpretatie van het ziekteverloop voorkomen.

e. Bronnen van fouten bij het schatten van het infectiepercentage

Bij het schatten van het infectiepercentage kunnen verschillende fouten optreden die de nauwkeurigheid van de resultaten kunnen beïnvloeden. Deze fouten kunnen worden onderverdeeld in drie hoofdcategorieën:

- **Onderschatting van de infectie** :
  Deze fout treedt op wanneer de beoordeling beperkt blijft tot de delen van de ziekte met zichtbare symptomen die nog aanwezig zijn op de plant. Geïnfecteerde bladeren vallen echter uiteindelijk af, en het moment van bladval hangt waarschijnlijk af van het ras (Forbes et al., 2014). Bovendien kan geïnfecteerd weefsel groen en symptoomloos blijven, waardoor het moeilijk te detecteren is. Sommige van deze weefsels kunnen zich ook in de sporulatiefase bevinden, maar dit fenomeen is niet altijd zichtbaar zonder een zeer nauwkeurige inspectie van het blad. Dit observatieniveau wordt zelden toegepast bij standaardbeoordelingen van rassen (Forbes et al., 2014).

- **Fout door menselijke beoordeling** :
  Onderzoek heeft aangetoond dat beoordelaars de neiging hebben om nauwkeuriger te zijn bij het beoordelen van ziekte op lage of hoge aantastingsniveaus, maar minder nauwkeurig bij gemiddelde niveaus (Forbes et al.2014).

- **Variabiliteit door de beoordelaar** :
  Om consistentie in de beoordelingen te waarborgen, is het aan te raden dat alle observaties binnen eenzelfde proef worden uitgevoerd door één enkele beoordelaar met ervaring in ziekte-evaluatie (Campbell et al. 1990).

7. Berekening van AUDPC en rAUDPC

De klassieke methoden voor het beoordelen van resistentie tegen de aardappelziekte zijn vaak semi-kwantitatief en weinig geschikt voor statistische analyses (Plich & Tatarowska, 2017).

De berekening van de AUDPC (area under the disease progress curve) of de rAUDPC (relative area under the disease progress curve) maakt een betrouwbare en gestandaardiseerde kwantificering van de ziekteontwikkeling mogelijk. De rAUDPC vergemakkelijkt de vergelijking tussen proeven en rassen. Deze benadering wordt vandaag de dag algemeen erkend in proeven op meerdere locaties (Plich& Tatarowska, 2017). Deze methoden maken het ook mogelijk om de snelheid en agressiviteit van de ziekteontwikkeling weer te geven.

De AUDPC wordt berekend op basis van minstens 5 informatieve observaties, volgens de formule voorgesteld door Fry (1978) :

$$AUDPC = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(xi+xi+1)}{2} * (ti + 1 - ti) \qquad \text{eq1}$$

$$rAUDPC = \frac{AUDPC}{(tn-t1)*100} \qquad \text{eq2}$$

Waarbij :

- t het tijdstip van elke observatie voorstelt,
- x het percentage aangetast bladoppervlak bij elke observatie is,
- n het totaal aantal observaties is.

De variabele “t” kan worden uitgedrukt in Juliaanse dagen, dagen na het planten of dagen na opkomst, afhankelijk van het gebruikte protocol. Als de noteringen worden uitgevoerd in punten in plaats van in het percentage aangetast blad, dan moet de berekening van de rAUDPC vermenigvuldigd worden met 10 en niet met 100, zoals aangegeven in vergelijking 2.

Berekening van de AUDPC en van de rAUDPC met Microsoft Excel

De AUDPC kan berekend worden met behulp van spreadsheets zoals Microsoft Excel. Hier volgt een voorbeeld van de procedure :

1. Voer de beoordelingsgegevens van vijf rassen in voor elk van de observatiedata.

2. Plaats de cursor in cel J4, die overeenkomt met de AUDPC van ras 1, en voer de volgende formule in :

$AUDPC_{ras1}$ =((C4+B4)/2)*(C3-B3)+((D4+C4)/2)*(D3-C3)+((E4+D4)/2)*(E3-D3)+((F4+E4)/2)*(F3-E3)+((G4+F4)/2)*(G3-F3)+((H4+G4)/ 2)*(H3-G3)

3. Kopieer de formule van cel J4 naar de cellen J5 tot J8 voor de andere variëteiten.

De parameter rAUDPC wordt berekend op basis van dezelfde tabel als bij de AUDPC

1. Plaats de cursor in cel K4, die overeenkomt met de rAUDPC van ras 1, en voer de volgende formule in:

$rAUDPC_{ras1}$ =J4/((H3-B3)*100)

Dit deelt de AUDPC door de maximaal mogelijke oppervlakte tussen de twee uiterste data (duur × 100%).

2. Kopieer de formule van cel K4 naar de cellen K5 tot en met K8 voor de andere variëteiten.

a. Statistische verwerking van gegevens

De AUDPC-waarden, evenals de infectiepercentages, kunnen worden onderworpen aan een variantieanalyse (ANOVA). Voorafgaand aan deze analyse wordt een statistische verkenning aanbevolen: het berekenen van gemiddelden, standaardafwijkingen, frequentieverdelingen en visualisatie via boxplots. Vervolgens kunnen meervoudige vergelijkingstests, zoals de Dunnett-test, worden toegepast om rassen onderling te vergelijken. Een residuanalyse wordt eveneens aanbevolen om de geldigheid van het statistisch model te controleren en de homogeniteit van de varianties te testen (Forbes et al., 2014).

De AUDPC en de infectiepercentages zijn pseudo-kwantitatieve variabelen met een hiërarchische structuur; ze kunnen dus zonder voorafgaande transformatie worden geanalyseerd (Jeger et al ., 2001).

b. Interpretatie van de resultaten

De AUDPC geeft een geïntegreerde maat voor de ziekteontwikkeling gedurende het hele seizoen. Uitgedrukt in %·dagen, komt deze waarde overeen met de accumulatie van de infectiepercentages in de loop van de tijd.

Hoe hoger de AUDPC-waarde, hoe groter de gevoeligheid van het genotype voor de aardappelziekte.

Om de resistentieprofielen beter te karakteriseren, is het vaak zinvol om een curve van de progressie van de ziekte te tekenen, die de evolutie van het percentage geïnfecteerd blad toont op de verschillende observatiedata. Deze grafiek biedt een dynamische visualisatie van de respons van de geteste genotypen (Forbes et al., 2014).

c. Correlatie met andere variabelen

Wanneer de opbrengstgegevens beschikbaar zijn, is het relevant om hun correlatie met de AUDPC te evalueren, met name via de Spearman-coëfficiënt. Deze methode, gebaseerd op het rangschikken van observaties, maakt het mogelijk om na te gaan of de rassen die het minst gevoelig zijn voor aardappelziekte ook goede agronomische prestaties behouden (Forbes et al., 2014). Een Spearman-coëfficiënt dicht bij 1,0 wijst op een sterke correlatie tussen opbrengstdaling en toename van de ernst van de ziekte.

8. Gestandaardiseerde resistentieschaal: een alternatief voor beschrijvende klassen

Wereldwijd bestaat er geen universeel systeem om de mate van resistentie van aardappelgenotypes tegen *Phytophthora infestans* nauwkeurig te meten. Rassen worden meestal beschrijvend ingedeeld als resistent, matig resistent of gevoelig (Forbes et al., 2014).

Hoewel deze categorieën nuttig zijn als indicatie, hebben ze verschillende beperkingen:

- Ze maken geen nauwkeurige vergelijking mogelijk tussen genotypen of tussen proeflocaties.
- Ze zijn niet gedetailleerd genoeg om agronomische beslissingen te ondersteunen, bijvoorbeeld op het vlak van fungicidenbeheer.

Om deze problematiek aan te pakken, hebben Yuen en Forbes (2009) een numerieke schaal van 0 tot 9 voorgesteld, gebaseerd op de AUDPC- of rAUDPC-waarden. Deze schaal maakt een strengere standaardisatie van de resistentieniveaus mogelijk, met name in multi-site proeven.

De waarde van de resistentieschaal wordt verkregen via de volgende formule:

$$Sx = Sy \frac{Dx}{Dy} \qquad \text{eq.3}$$

Waarbij :

- Sy = gevoeligheidswaarde toegekend aan het referentieras (meestal 9 voor een zeer gevoelig genotype)
- Dy= AUDPC- of rAUDPC-waarde waargenomen voor dit referentieras
- Dx = AUDPC- of rAUDPC-waarde van het onderzochte genotype
- Sx = berekende gevoeligheidswaarde voor het onderzochte genotype

Bibliografie

Aylor, D. E., Fry, W. E., Mayton, H., & Andrade-Piedra, J. L. (2001). Quantifying the aerial dissemination of *Phytophthora infestans* sporangia from potato plants. *Phytopathology, 91*(12), 1211–1218. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.12.1211

Aylor, D. E., Taylor, G. S., & Boehm, M. J. (2011). An aerobiological framework for assessing the risk of pathogen movement through the air. *Phytopathology, 101*(6), 614–622. https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-10-0252

Campbell, C. L., & Madden, L. V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. John Wiley & Sons.

Drenth, A., Turkensteen, L. J., & Govers, F. (1995). The occurrence of the A2 mating type of *Phytophthora infestans* in the Netherlands; significance and consequences. *European Journal of Plant Pathology, 101*(6), 659–669. https://doi.org/10.1007/BF01874864

Fernández-Pavía, S. P., Grünwald, N. J., Diaz-Valasis, M., Cadena-Hinojosa, M. A., & Fry, W. E. (2004). Genetic structure of *Phytophthora infestans* populations in Mexico. *Phytopathology, 94*(4), 376–382. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.4.376

Forbes, G., Pérez, W., & Andrade Piedra, J. L. (2014). *Field assessment of resistance in potato to Phytophthora infestans: International cooperators guide*. Lima, Pérou : International Potato Center (CIP). ISBN 978-92-9060-440-2.

Fry, W. E. (1978). Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of potato late blight. *Phytopathology, 68*, 1650–1655.

Fry, W. E. (2008). *Phytophthora infestans*: The plant (and R gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology, 9*(3), 385–402. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00465.x

Fry, W. E. (2020). *Phytophthora infestans*: New tools (and old ones) lead to new understanding and precision management. *Annual Review of Phytopathology, 58*, 529–556. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012703

Gevens, A. J., & Seidl, A. C. (2013). First report of late blight caused by *Phytophthora infestans* clonal lineage US-23 on tomato and potato in Wisconsin, United States. *Plant Disease, 97*(6), 839.

Goffart, J.-P., Haverkort, A., Storey, M., Haase, N., Martin, M.,Lebrun, P., et al. (2022). Potato Production in Northwest-ern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): Characteristics, Issues. Challenges and Opportunities. Potato Research, 65(3), 503–547. https:// doi. org/ 10. 1007/ s11540- 021- 09535-8

Horsfall, J. G., & Barratt, R. W. (1945). An improved grading system for measuring plant disease. *Phytopathology, 35*, 655.

Jeger, M. J., & Viljanen-Rollinson, S. L. H. (2001). The use of the area under the disease progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theoretical and Applied Genetics, 102*, 32–36.

Le Vourch, V., Decroës, A., Thonon, S., Lienard, C., Van Steenberge, C., Rosillon, D., … & Legrève, A. (2025). Spatiotemporal dynamics of *Phytophthora infestans* airborne inoculum in Belgium. *European Journal of Plant Pathology, 171*(2), 323–340.

Nechwatal, J., & Zellner, M. (2015). Potential suitability of various leaf treatment products as copper substitutes for the control of late blight (Phytophthora infestans) in organic potato farming. Potato Research, 58(3), 261–276. https://doi.org/10.1007/s11540-015-9302-8

Pellé, R., Bozec, M., Andrivon, D., Soyer, J., & Ellissèche, D. (2005). Méthode d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs. *Cahier des techniques*, numéro spécial, 73.

Plich, J., & Tatarowska, B. (2017). Field evaluation of potato resistance against *Phytophthora infestans* under natural infection pressure. *Plant Breeding and Seed Science, 76*, 25–28.

Rehman, M., Liu, L., Wang, Q., Saleem, M. H., Bashir, S., Ullah, S., & Peng, D. (2019). Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: A review. Environmental Science and Pollution Research, 26, 18003–18016. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05073-6

Severns, P. M., Sackett, K. E., Farber, D. H., & Mundt, C. C. (2019). Consequences of long-distance dispersal for epidemic spread: patterns, scaling, and mitigation. *Plant Disease, 103*(2), 177–191. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-18-0505-FE

Yuen, J. (2021). Pathogens which threaten food security: *Phytophthora infestans*, the potato late blight pathogen. *Food Security, 13*(2), 247–253.