



**HAL**  
open science

# Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus Herpès simplex type 1 (HSV1) après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal

Antoine Rousseau

► **To cite this version:**

Antoine Rousseau. Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus Herpès simplex type 1 (HSV1) après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal. *Virologie*. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLS339 . tel-02885752

**HAL Id: tel-02885752**

**<https://theses.hal.science/tel-02885752>**

Submitted on 1 Jul 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus Herpès simplex type 1 après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°569 : Innovation thérapeutique : du fondamental à  
l'appliqué (ITFA)

université  
PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE

Innovation thérapeutique :  
du fondamental à l'appliqué

Thèse présentée et soutenue au Kremlin Bicêtre, le 03/10/2019, par

**Antoine ROUSSEAU**

## Composition du Jury :

**Cécile Goujard**

PUPH, Université Paris-Sud (INSERM U1018)

Présidente

**Marc Labetoulle**

PUPH, Université Paris-Sud (IMVA-IDMIT UMR1184)

Directeur

**Françoise Brignole-Baudouin**

MCUPH, Sorbonne Université (Paris 5 / Paris 6), (INSERM/CNRS/S12 IdV)

Rapporteure

**Vincent Vieillard**

DR2, Sorbonne Université (Paris 6), UMRS CR7/INSERM U1135/CNRS 8255

Rapporteur

**Christophe Baudouin**

PUPH, Université Versailles Saint-Quentin (S12 IdV)

Examineur

**Catherine Creuzot-Garcher**

PUPH, Université de Dijon

Examineuse

**David Boutolleau**

MCUPH, Sorbonne Université, INSERM, (iPLESP)

Examineur

**Roger Le Grand**

DR, Université Paris-Sud (IMVA-IDMIT UMR1184)

Examineur

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier très profondément Monsieur Marc Labetoulle d'avoir dirigé ce travail, qui, tout en restant dans la thématique de notre équipe, inaugure une nouvelle direction prometteuse. Sa conception humaniste de la médecine et des sciences, et son énergie à toute épreuve sont pour moi une source d'inspiration. Sa confiance et son soutien constant sont un grand honneur et une aide précieuse.

Je remercie très vivement Madame Cécile Goujard d'avoir accepté de présider ma thèse. Ses connaissances cliniques et théoriques de l'immunologie et des maladies infectieuses, notamment virales, seront autant d'atouts pour la présidence de ce jury. Je la prie de trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Françoise Brignole-Baudouin et Monsieur Vincent Vieillard d'avoir accepté la lourde tâche d'être les rapporteurs de ce travail, du temps qu'ils y ont consacré et de leur bienveillance. L'expertise de Madame Brignole-Baudouin dans les techniques d'investigation immunologique, et celle de Monsieur Vieillard en immuno-virologie sont un grand apport pour l'analyse de ce travail. Qu'ils reçoivent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je remercie Madame Catherine Creuzot-Garcher et Monsieur Christophe Baudouin d'avoir accepté d'examiner ce rapport. Le dynamisme pédagogique et la multiplicité des domaines d'expertise de Madame Creuzot-Garcher, de même que la curiosité et l'intuition scientifiques de Monsieur Baudouin sont pour moi des exemples. Qu'ils soient assurés de ma reconnaissance et de mon profond respect.

Je remercie également Monsieur David Boutolleau, dont les travaux menés avec Madame Sonia Burrel sur les résistances des herpèsvirus constituent un apport majeur dans ce domaine. C'est un très grand honneur de travailler avec eux pour certains de nos axes de recherche clinique.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Roger Le Grand, qui a accueilli notre équipe au sein d'IDMIT, nous permettant ainsi de trouver l'environnement scientifique indispensable pour développer les aspects immuno-virologiques de nos thématiques de recherche. Ses conseils avisés, son soutien constant et son engagement au quotidien représentent à mes yeux un modèle et un moteur.



Je voudrais remercier très chaleureusement Monsieur Oscar Haigh, qui a rejoint notre équipe il y a 2 ans. Il a mis toute son expertise en immunologie et tout son engagement au service de ce projet. Ce travail n'aurait pas été possible sans son soutien et son aide constants. Je lui exprime ici toute ma gratitude et mon amitié, et lui souhaite tout le meilleur pour la magnifique aventure qui l'attend... Thanks and all the best M8 !

Je remercie Nolwenn Pocard, ma prédécesseuse, qui a initié le travail sur la protection contre HSV-1 induite par des souches atténuées. Cela a été un plaisir de travailler à ses côtés. Je lui souhaite tout le meilleur dans sa nouvelle carrière.

Je remercie très chaleureusement toute l'équipe d'IDMIT, pour son accueil et son aide constante. Isabelle Mangeot et Frédéric Ducancel, tout d'abord, qui nous ont guidé, et nous guident toujours dans notre nouvelle institution. Pauline Maisonnasse et Delphine Desjardins, avec qui j'ai partagé mon bureau la première année et qui m'ont tant aidé à m'intégrer, Pascal Morin, Deborah Le Gal et Sébastien Jacquin sans qui nous n'aurions pas pu reprendre nos travaux expérimentaux. Pierre Roques, Nathalie Bosquet, Bruno Vaslin, Frédéric Martinon et Benoit Favier toujours bienveillants et disponibles, et enfin les autres thésards, en particulier Julien, Sixtine, Laura, Jean-Louis et Candie, toujours prêts à aider et à échanger des informations utiles...

Je remercie également toute l'équipe de virologie moléculaire et structurale du CNRS, notamment Yves Gaudin, qui m'a accueilli avec bienveillance avant le déménagement de l'équipe vers le CEA.

Je remercie aussi toute l'équipe du Service d'Ophtalmologie de Bicêtre pour son soutien pendant mes années de Thèse de Science : Emmanuel Barreau et Mohamed M'garrech, praticiens hospitaliers dans le service, aux côtés desquels c'est un plaisir et un honneur de travailler.

Les chefs de clinique avec qui j'ai eu la chance de travailler pendant cette thèse : Anne-Laurence Best, une excellente ophtalmologiste, une enseignante impliquée et une collègue en or, sur qui j'ai toujours pu compter pendant ces années passées entre la recherche et les soins, Jérémie Bénichou, que je connais depuis peu, mais dont le bon esprit et la motivation sont bien agréables au quotidien, Marine Legrand, devenue depuis « ultraMarine », à qui je souhaite tout le meilleur pour la suite.

Les différents internes que j'ai encadré au cours de ces années de thèse, et sur qui j'ai pu également compter, notamment Benjamin S, Hugo, Pierre-Emmanuel, Arnaud, Benjamin M. Je peux en témoigner, le futur de l'ophtalmologie française est prometteur !

L'ensemble de l'équipe paramédicale du Service d'ophtalmologie de Bicêtre (infirmières, aides-soignantes, orthoptistes, secrétaires médicales) : une équipe exceptionnelle de gentillesse, de dévouement et d'humanité, qui ont largement contribué à ma volonté et à ma fierté de servir l'Hôpital Public.



A mes parents, qui m'ont tout donné, et que je ne pourrai jamais assez remercier,

A ma sœur Agnès que j'aime très fort, et à Simon, mon neveu qui cartonne !

A ma belle-famille, que j'ai de la chance d'avoir et qui m'a si bien accueilli,

A mes amis, que j'ai tellement hâte de retrouver...

Aux 3 amours de ma vie : Julie, ma femme adorée, sans qui rien ne serait possible, Esther et Ellie, mes filles chéries, mes étoiles magnifiques,

A la vie !



## Abbreviations

ACV : Aciclovir  
ADCC : Cytotoxicité à médiation cellulaire dépendante des Anticorps  
APC : Cellule présentatrice d'antigène  
ATRX : *alpha-thalassemia/mental retardation syndrome protein*  
ATRXL : *ATP-dependent helicase*  
CCL : C-C motif Ligand  
CD : *Cluster of Differentiation*  
cGAS / STING : *cGMP–AMP synthase (cGAS)–stimulator of interferon genes (STING)*  
CMC : Carboxyméthylcellulose  
CMH-I : Complexe majeur d'histocompatibilité de type I  
CMV : Cytomegalovirus  
CPA : cellule présentatrice d'antigène  
CSF-1 : *Colony stimulating factor 1*  
CTLA-4 : *Cytotoxic T-Lymphocyte Antigen 4*  
CXCL : *C-X-C motif Ligand*  
DAI : *DNA-dependent activator of IFN-regulatory factors*  
Daxx : *Death domain-associated protein 6*  
DC : Cellule dendritique  
DHX9 / DHX36 : *DEAH box proteins 9 / 36*  
DMEM : *Dubelcco's modified eagle medium*  
E: *Early*  
EBV : Epstein-Barr Virus  
ECP : eosinophilic cationic protein  
EPO : éosinopéroxydase  
FSC : *Forward scatter*  
gB, C, D, H, L : glycoprotéines d'enveloppe B,C, D, H, L  
GCV : Ganciclovir  
GM-CSF : *Granulocyte / Macrophage-colony stimulating Factor*  
HCF1 : *Host Cell Factor*  
HHV6 / HHV7 / HHV8 : *Human Herpesvirus 6,7,8*  
HSV1 / HSV2 : Herpes simplex virus 1 et 2  
HVEM : Herpesvirus Entry Mediator  
ICP : *Infected Cell Protein*  
IE : *Immediate Early*  
IFI 16 : *IFN-γ-Inducible protein*  
IFN : Interféron  
IFNAR : *IFN-Alpha receptor*  
IHP : Inhibiteur d'hélicase-primase  
IL : Interleukine  
IR<sub>s</sub>, IR<sub>L</sub> : *Inverted Repeat short / Inverted repeat long*  
ISG : *IFN inducible genes*  
J.p.i. : jour post infection  
JAK/STAT : *Janus Kinase (JAK) / Signal Transducer and Activator of Transcription (STAT)*  
JNK : cJun N-terminal Kinase



KIR : *Killer cell Inhibitory immunoglobulin-like Receptor*  
 L : *Late*  
 LAP : *Latency Active Promoter*  
 LAT : *Latency Associated Transcript*  
 LT : *Lymphocytes T*  
 LTCD4 : *Lymphocytes T CD4+*  
 LTCD8 : *Lymphocytes T CD8+*  
 MBP : *protéine basique majeure / Major Basic Protein*  
 MDA : *Melanoma Differentiation-Associated protein 5*  
 mDC : *Cellule dendritique myéloïde*  
 miARN : *micro-ARN*  
 MIC : *MHC class I polypeptide-related sequence A and B*  
 MIP : *Macrophage Inflammatory Protein*  
 MOI : *Multiplicité d'infection*  
 MPO : *myéloperoxydase*  
 ncARN : *ARN non codant*  
 NEMO : *NFκB Essential Modulator*  
 NK : *Natural killer*  
 OAS : *Oligoadenylate Synthetase*  
 Oct1 : *Octamer Binding Protein 1*  
 PAF : *Platelet Activating Factor*  
 PAMPS : *Pathogen Associated Molecular Patterns*  
 PCR : *Polymerase Chain reaction*  
 PD-1 : *Programmed cell Death-1*  
 pDC : *Cellule dendritique plasmacytoïde*  
 PE : *Polynucléaire neutrophile*  
 PML : *Promyelocytic Leukemia*  
 PML-NB : *PML-Nuclear body*  
 PNN : *Polynucléaire neutrophile*  
 PRR : *Pathogen recognition receptors*  
 RANTES : *Regulated on activation, normal T cell expressed and secreted*  
 RE : *réticulum endoplasmique*  
 RIG-I : *Retinoic acid-Inducible Gene I*  
 ROS : *Reactive oxygen species / espèce réactive de l'oxygène*  
 RT : *Reverse Transcriptase*  
 SNC : *Système nerveux central*  
 SSC : *Side scatter*  
 STAT1 : *Signal transducer and activator of transcription 1*  
 TAP : *Transporter associated with antigen processing*  
 TG : *Ganglion trigéminé*  
 TIM3 : *T-cell immunoglobulin and mucin-domain containing-3*  
 TK : *Thymidine kinase*  
 TLR : *Toll Like Receptor*  
 TRAIL-TRAIL récepteur : *TNF apoptosis inducing ligand*  
 TRIF : *TLR-domain-containing adaptor inducing IFN-β*  
 TR<sub>S</sub>, TR<sub>L</sub> : *Terminal Repeat short / Terminal repeat long*  
 U<sub>L</sub> : *Unique long*



ULBP : UL16 binding protein

U<sub>s</sub> : *Unique hort*

UV : ultraviolet

VACV : Valaciclovir

VHS : *Virus host hutoff*

VP16 : *Viral protein 16*

VZV : Varicelle-zona-virus





# Table des matières

## Chapitre I : Données bibliographiques

1 Pathogénie et traitements des infections à HSV-1.....	13
1.1 Physiopathologie de l'infection à HSV-1.....	13
1.2 Manifestations cliniques liées à HSV-1.....	14
1.2.1 Manifestations cliniques extra-oculaires liées à HSV-1.....	14
1.2.1.1 Gingivo-stomatite herpétique.....	14
1.2.1.2 Herpès labial.....	14
1.2.1.3 Encéphalite herpétique.....	14
1.2.1.4 Infections néonatales et congénitales.....	15
1.2.2 Atteintes oculaires à HSV-1 : clinique et épidémiologie.....	16
1.3 Traitements anti-herpétiques actuels : principes et limites .....	17
1.3.1 Inhibiteurs nucléosidiques de l'ADN polymérase virale.....	17
1.3.2 Inhibiteurs non nucléosidiques de l'ADN polymérase virale.....	18
1.3.3 Inhibiteurs du complexe hélicase primase.....	18
1.3.4 Limites des traitements des atteintes herpétiques oculaires.....	19
2 Les Herpesviridae et HSV-1.....	23
2.1 Les <i>Herpesviridae</i> .....	23
2.2 HSV-1 : Structure.....	23
2.3 HSV-1 : Cycle répliatif.....	25
2.4 HSV-1 : Latence et réactivation.....	29
2.4.1 Latence.....	30
2.4.1.1 Etablissement de la latence.....	30
2.4.1.2 Régulation épigénétique de la latence.....	31
2.4.1.3 Les LAT ( <i>Latency Associated Transcripts</i> ) .....	32
2.4.2 Réactivation.....	36
2.5 Modèles d'études du cycle d'HSV-1.....	38
2.5.1 Modèles <i>in vitro</i> .....	38
2.5.2 Modèles animaux : <i>généralités</i> .....	39
2.5.3 Le modèle murin oro-oculaire.....	40
2.6 Rôle des corps nucléaires PML dans l'alternance latence / réactivation.....	44
3 La réponse immunitaire anti-HSV-1.....	49
3.1 Réponse immune innée.....	49
3.1.1 Réponse interféron.....	49



3.1.2 Rôle des cellules <i>Natural Killer</i> dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	52
3.1.2.1 Rappels sur les cellules <i>Natural Killer</i> (NK).....	52
3.1.2.2 Rôle des NK dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	54
3.1.3 Rôle des polynucléaires neutrophiles dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	58
3.1.3.1 Rappels sur les PNN.....	58
3.1.3.2 Rôle des PNN dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	59
3.1.4 Rôle des polynucléaires éosinophiles dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	61
3.1.4.1 Rappels sur les PNE.....	61
3.1.4.2 Rôle des PNE dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	62
3.1.5 Mécanismes d'échappement d'HSV-1 à la réponse immune innée.....	63
3.1.5.1 Protéines virale diminuant la réponse interféron.....	63
3.1.5.2 Mécanismes d'échappement aux NK.....	64
3.2 Présentation de l'antigène : la transition vers la réponse adaptative.....	64
3.2.1 Monocytes / Macrophages.....	64
3.2.1.1 Généralités.....	64
3.2.1.2 Rôle dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	66
3.2.2 Cellules dendritiques.....	68
3.2.2.1 Généralités.....	68
3.2.2.2 Rôle dans l'immunité innée anti-HSV-1.....	70
3.3 Réponse immunitaire adaptative.....	71
3.3.1 Réponse humorale.....	71
3.3.2 Réponse cellulaire.....	72
3.3.3 Mécanismes d'échappement d'HSV-1 à la réponse immune adaptative.....	73
4 Stratégies vaccinales anti-HSV-1.....	74
4.1 Vaccins anti-VZV.....	74
4.1.1 Vaccins vivants atténués.....	74
4.1.1.1 Vaccins anti-varicelle.....	74
4.1.1.2 Vaccins anti-zona.....	75
4.1.2 Vaccins sous-unitaires.....	75
4.2 Tentatives de vaccins anti-HSV-1.....	76
4.2.1 Vaccins inactivés.....	76
4.2.2 Vaccins sous-unitaires.....	76
4.2.3 Vaccins vivants atténués.....	77
4.2.3.1 Vaccins non réplicatifs.....	77
4.2.3.2 Vaccins réplicatifs.....	79



## **Chapitre II : Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus Herpès simplex type 1 après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal**

1 Résultats obtenus récemment par l'équipe : vers un vaccin anti-HSV-1 efficace ?.....	82
2 Objectifs de la thèse.....	82
3 Matériel et méthodes.....	85
3.1 Virus et cellules.....	85
3.1.1 Virus.....	85
3.1.2 Cellules.....	85
3.2 Préparation des concentrés viraux.....	86
3.2.1 Infection des cellules.....	86
3.2.2 Récolte des cellules.....	86
3.2.3 Détermination du titre des concentrés viraux.....	86
3.3 Techniques d'expérimentation animale.....	88
3.3.1 Animaux utilisés.....	88
3.3.2 Inoculation des animaux, surveillance clinique et biologique.....	88
3.3.3 Groupes d'étude.....	89
3.3.4 Sacrifices des animaux / points limites.....	90
3.4 Analyse de la réponse immunitaire.....	90
3.4.1 Prélèvements des échantillons.....	90
3.4.2 Cytométrie en flux multiparamétrique.....	91
3.4.2.1 Préparation des tissus.....	91
3.4.2.2 Immunomarquages de surface.....	92
3.4.2.3 Protocole de cytométrie en flux multiparamétrique (CMF).....	92
3.4.2.4 Analyse des données.....	93
3.4.3 Détection et quantification des chémokines inflammatoires.....	93
3.4.3.1 Préparation des homogénats tissulaires.....	93
3.4.3.2 Principe du kit LEGENDplex.....	94
3.4.3.3 Réalisation du test.....	95
3.4.3.4 Analyses de données.....	96
3.4.4 Etude cytologique des infiltrats.....	96
3.4.4.1 Isolement des cellules immunitaires de la lèvre et du TG par CMF.....	96
3.4.4.2 Centrifugation et étude cytologique.....	96
3.4.5 Analyses statistiques.....	97



4 Résultats.....	98
4.1 Définition des populations en cytométrie en flux (CMF) .....	98
4.2 Phénomènes immunologiques au site d'inoculation.....	99
4.2.1 L'infiltrat immunitaire global (cellules CD45 <sup>+</sup> ) apparait plus précocement et disparaît plus vite dans les lèvres infectées par SC16 du groupe réinfection.....	99
4.2.2 L'infection préalable par TK <sub>del</sub> induit des modifications qualitatives, quantitatives et dynamiques des sous-types immunitaires au site de la réinfection par SC16.....	101
4.2.3 L'infiltrat immunitaire dans les lèvres réinfectées est orienté vers une réponse adaptative.....	104
4.2.4 Les concentrations de chémokines inflammatoires sont diminuées lors d'une réinfection par SC16.....	105
4.3 Phénomènes immunologiques dans les TG.....	108
4.3.1 L'infiltrat immunitaire est diminué du côté de la réinfection par SC16.....	108
4.3.2 Certaines types cellulaires sont absents des TG ipsilatéraux à la réinfection par SC16.....	109
4.3.3 Les lymphocytes T prédominent dans les TG, avec une cinétique différente lors de la réinfection par SC16.....	112
4.3.4 Les chémokines inflammatoires induites par l'infection des TG par SC16 sont nettement diminuées lors de la réinfection.....	113
4.4 Comparaison en cytologie des infiltrats dans la lèvre et le TG.....	116
5 Discussion.....	118
5.1 Pourquoi un délai de 4 jours pour obtenir une protection par TK <sub>del</sub> ? .....	118
5.2 Effet de la primo-infection par TK <sub>del</sub> la sur la cinétique de l'infiltrat.....	119
5.3 Différents profils d'inflammation au site d'inoculation.....	120
5.4 Différents profils d'inflammation dans les TG.....	121
5.5 Le modèle expérimental influence les résultats des études immunologiques portant sur l'infection par HSV-1, et notamment le rôle des PNN.....	121
5.6 Les polynucléaires éosinophiles pourraient être impliqués dans le contrôle de l'infection par HSV-1.....	123
5.7 La primo-infection par TK <sub>del</sub> renforce l'immunosurveillance dans la lèvre.....	124
5.8 La souche non neurovirulente TK <sub>del</sub> : avantages et inconvénients.....	125
Conclusion et perspectives.....	127
Références.....	130



## Annexes

**Article 1 :** HSV-1 replication, ocular disease and reactivations from latency are restricted unilaterally after inoculation of virus into the lip.

**Article 2 :** Local immune alterations associated with a non-neurovirulent modified strain of HSV-1-mediated protection in a oro-ocular model of HSV-1 disease.



# Chapitre I : Données bibliographiques

## 1 Pathogénie et traitements des infections à Herpès simplex 1 (HSV-1)

### 1.1 Physiopathologie de l'infection à HSV-1

Ce virus enveloppé, donc fragile dans le milieu extérieur, se transmet le plus souvent par un contact direct, ou par l'intermédiaire des gouttelettes de Pflügge, au niveau de la muqueuse oropharyngée. Après une réplication dans les cellules épithéliales au site de la primo-infection (asymptomatique dans la presque totalité des cas [1]), le virus pénètre dans les terminaisons nerveuses sensibles innervant le site d'inoculation. La capsid virale non enveloppée est alors transportée de façon rétrograde via les protéines du cytosquelette jusqu'au noyau des neurones sensitifs du ganglion trigéminal (TG)[2 3]. Dans un même ganglion nerveux, le virus peut entrer en latence dans certains neurones, et/ou engager une infection lytique dans d'autres neurones. Cette réplication peut entraîner une propagation vers d'autres sites neurologiques, ce qui explique que les réactivations peuvent avoir lieu dans d'autres tissus que ceux touchés par la primo-infection (notamment les tissus oculaires et cérébraux).

Spontanément ou à la faveur de divers stimuli tels que la fièvre, l'immunodépression, le stress ou une infection intercurrente, le virus peut se réactiver dans les neurones où il se trouve en latence [4]. Les particules virales ainsi produites sont alors transportées de manière antérograde via les axones vers les territoires innervés par ces neurones, où la reprise de la réplication peut entraîner des manifestations cliniques (**Figure 1**).

La primo-infection herpétique a le plus souvent lieu durant les deux premières décennies de la vie. Aux États-Unis, la séro-prévalence chez les 14-19 ans avoisine les 30%, elle passe à 41% chez les 20-29 ans, 54% chez les 30-39 ans, tandis qu'elle atteint 60% chez les 40-49 ans [5].

A l'âge adulte, la quasi-totalité des individus hébergent HSV-1 dans le TG, y compris ceux dont la sérologie est négative [6]. La fréquence des réactivations herpétiques et leur gravité résultent de la combinaison de plusieurs facteurs : la virulence de la souche virale, la réponse immunitaire de l'hôte et le niveau d'exposition aux stimuli de réactivation virale.



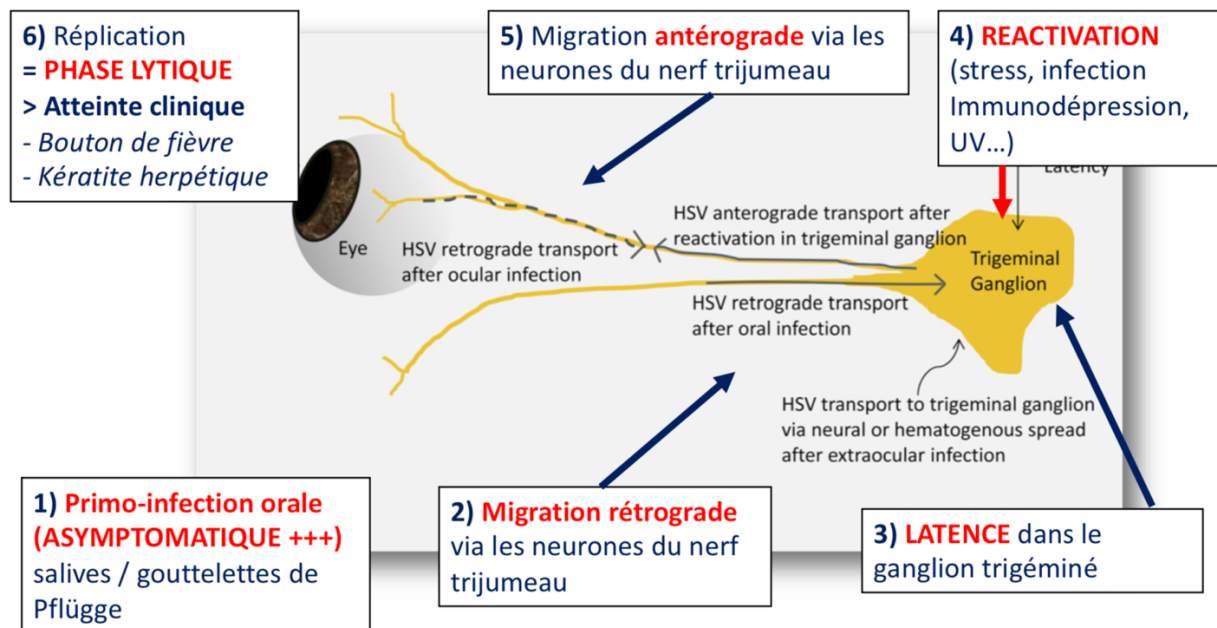


Figure 1 : physiopathologie humaine de l'infection à HSV-1, modifié d'après [4].

## 1.2 Manifestations cliniques liées à HSV-1

### 1.2.1 Manifestations cliniques extra-oculaires liées à HSV-1

#### 1.2.1.1 Gingivo-stomatite herpétique

Comme vu plus haut, la primo-infection est asymptomatique dans 94% des cas. Dans les 6% restant, elle est le plus souvent responsable d'une **gingivo-stomatite**, touchant le plus souvent des enfants âgés de moins de 5 ans, avec atteinte buccale diffuse et dysphagiate, associée à des signes généraux (fièvre et adénopathies).

#### 1.2.1.2 Herpès labial

L'herpès labial est de loin la manifestation clinique la plus fréquente d'HSV-1. Il s'agit toujours de récurrences cliniques liées à une réactivation virale. L'herpès labial, qui se manifeste sous la forme d'une éruption localisée, érythémato-vésiculeuse, généralement douloureuse, et récidivante, concerne 20 à 40% de la population [7]. Malgré les récurrences, l'herpès labial ne laisse habituellement aucune séquelle.

#### 1.2.1.3 Encéphalite herpétique

Elle résulte de la propagation virale dans d'autres systèmes neurologiques, non sensitifs, mais reliés au site de primo-infection. Cette manifestation d'HSV-1 est fort heureusement très rare



(incidence annuelle estimée entre 2 et 4 cas par million). Elle occupe toutefois la première place en termes de fréquence et de sévérité au sein des encéphalites virales. Elle touche le plus souvent des enfants et jeunes adultes apparemment immunocompétents avec un taux de mortalité de 70% sans traitement, et des séquelles souvent lourdes. Elle peut résulter d'une **primo-infection ou d'une réactivation** [8 9]. Elle survient à tout âge, avec une incidence plus élevée chez les enfants de moins de 3 ans (primo-infection) ou chez les adultes de plus de 50 ans (récurrences probables). Elle se caractérise, dans sa forme classique, par une encéphalite aiguë nécrosante temporale. Le début est rapide, avec en moins de 48h l'apparition d'une fièvre et de céphalées, puis de troubles mnésiques, phasiques et d'hallucinations. Les manifestations cliniques évoluent ensuite vers des convulsions et des paralysies précédant le coma. Les patients survivants à l'encéphalite herpétique gardent souvent des séquelles neurologiques sévères et permanentes. Seule une infime minorité de personnes infectées par HSV-1 développe une encéphalite herpétique. Des mutations de certains gènes intervenant dans l'immunité innée, et en particulier dans ceux impliqués dans la réponse interféron (IFN), ont été identifiées chez des patients et/ou leur famille présentant des encéphalites causées par HSV-1. Les gènes mis en cause sont les gènes UNC-93B [10], TLR 3 (*Toll-Like Receptor 3*) [11], TRIF (*TLR-domain-containing inducing IFN- $\beta$* ) [12], NEMO (*NF $\kappa$ B Essential Modulator*) [13], codant pour des protéines de la voie de signalisation TLR3, ainsi que le gène codant pour STAT1 (*Signal Transducer and Activator of Transcription 1*) [14]. Les patients ayant des anomalies dans un de ces gènes partagent un même phénotype cellulaire : une déficience de production d'IFN de type I ou III par la cellule infectée par HSV-1, ce qui donne lieu à une réplication virale plus intense et une mort cellulaire plus importante.

#### 1.2.1.4 Infections néonatales et congénitales

L'herpès néonatal est une infection potentiellement létale. Sa fréquence est de l'ordre de 10 cas pour 1000 000 naissances, avec 14 000 cas par an dans le monde [15]. On distingue classiquement 3 formes cliniques, les formes localisées dermatologiques / buccales ou oculaires, les formes limitées au système nerveux central et les formes disséminées [16].





Si HSV-2 est globalement majoritaire (contamination *per-partum* lors du passage de la filière génitale), HSV-1 est plus fréquent en Amérique du Nord et en Europe [15] (transmission *post-partum* par des lésions orales ou cutanées) et cause généralement des formes disséminées sévères [16].

Les infections limitées à la peau ont un bon pronostic. En revanche, le taux de mortalité atteint 15% chez les enfants atteints d'encéphalites, et de près de 60% chez les enfants ayant une dissémination systémique du virus, et ce malgré une prise en charge thérapeutique adaptée. Les enfants survivant aux encéphalites et aux infections disséminées peuvent présenter des séquelles, telles que des convulsions, un retard psychomoteur, des troubles cognitifs, voire une cécité [16].

L'infection congénitale à HSV peut également avoir des conséquences dramatiques. Elle peut comporter des atteintes cutanées (aplasié cutanée, lésions hyper ou hypo pigmentées), neurologiques (calcifications intracérébrales, hydro-anencéphalie, microcéphalie) ou oculaires (séquelles de chorioretinite, microphthalmie, cataracte, atrophie optique)[16].

### 1.2.2 Atteintes oculaires à HSV-1 : clinique et épidémiologie

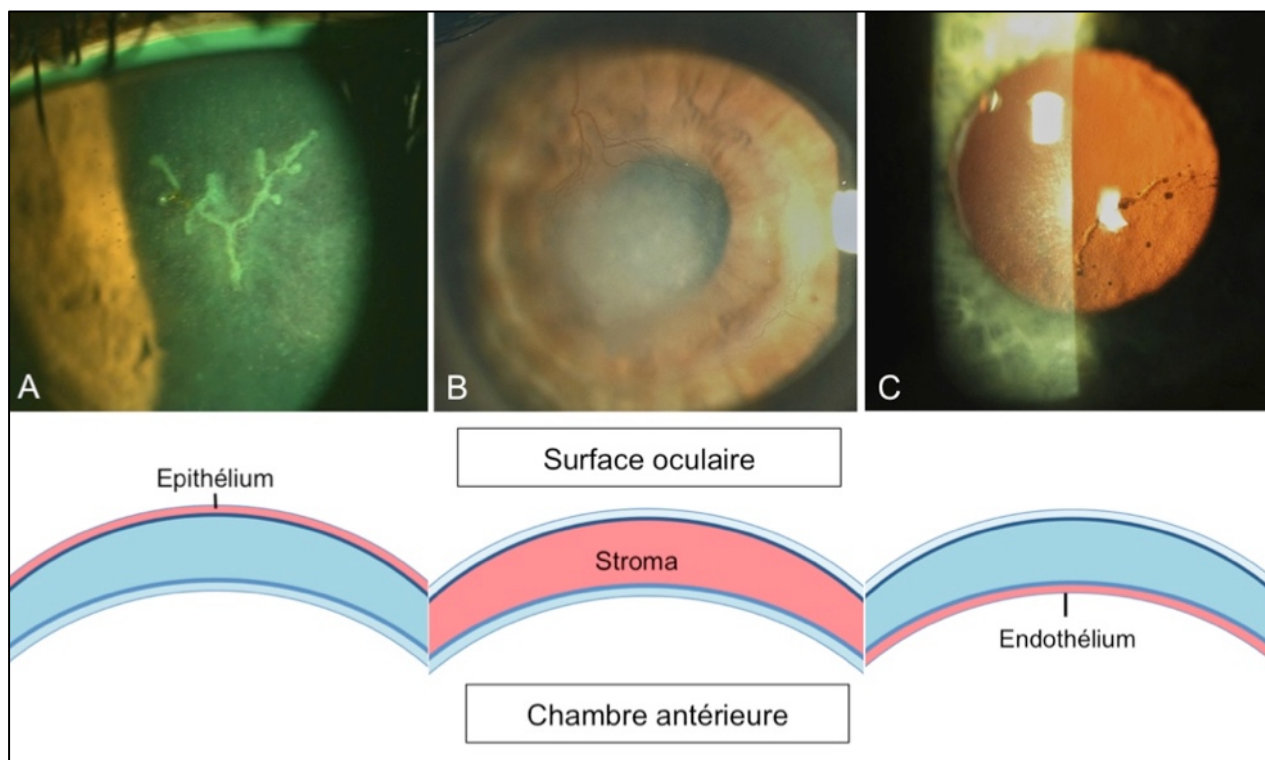
Les pathologies oculaires d'origine herpétique représentent un vrai problème de santé publique par leur fréquence (incidence annuelle de 31/100 000 habitants, prévalence de 150/100 000, soit environ 18 000 épisodes d'herpès oculaire par an en France et 90 000 patients concernés) [17], et par leur caractère souvent invalidant, allant de la gêne fonctionnelle à la baisse d'acuité visuelle définitive. Le risque de développer une réactivation oculaire est estimé à 1% pour une vie d'homme [18]. L'herpès oculaire est d'ailleurs la principale cause infectieuse de cécité acquise (unilatérale) dans les pays industrialisés [4].

Les manifestations herpétiques oculaires les plus fréquentes sont les kératites (épithéliale, stromale ou endothéliale (**Figure 2**)), qui sont **unilatérales** dans plus de 90% des cas [19]. Les autres atteintes du segment antérieur sont les conjonctivites (dont la fréquence est sous-estimée [19]) et les blépharites (se manifestant comme des bouquets de vésicules au niveau des paupières). Plus exceptionnelles, les rétinites nécrosantes à HSV-1 ont une physiopathologie différente (propagation du virus par le nerf optique [20]), le pronostic visuel est souvent réservé [20].

Les récurrences **touchent toujours le même œil**, les kératites finissent par entraîner une opacification cornéenne avec un risque d'acuité visuelle inférieure à 1/10 atteignant 11% après 20



ans d'évolution [18]. Les formes stromales et endothéliales ont un moins bon pronostic. En cas de baisse visuelle profonde, seule la greffe de cornée permet de recouvrer la vue. Les kératites herpétiques représentent d'ailleurs environ 10% des indications de greffe de cornée en France [21].



**Figure 2** : Les principales formes cliniques de kératites. En haut, photos en lampe à fente. **A) Kératite épithéliale** dans une forme « dendritique » après instillation de collyre à la fluorescéine. **B) Kératite stromale** : opacification centrale avec néovaisseaux cornéens. **C) Kératite endothéliale** avec précipités rétro-cornéens.

Les kératites herpétiques, par leur caractère récidivant, leurs conséquences visuelles, et les anomalies chroniques de la surface oculaire qui les accompagnent, entraînent une altération majeure de la **qualité de vie des patients**, qui persiste entre les récurrences [22].

### 1.3 Traitements anti-herpétiques actuels : principes et limites

#### 1.3.1 Inhibiteurs nucléosidiques de l'ADN polymérase virale

C'est la classe la plus utilisée. La molécule de référence est l'**aciclovir** (ACV), un analogue de la déoxyguanosine qui fonctionne comme un terminateur de chaîne, et nécessite, pour devenir actif, une triple phosphorylation dont la première ne peut être réalisée que par la **thymidine kinase** (TK) virale [23]. Son action est par conséquent très spécifique des cellules infectées, ce qui explique



sa très bonne tolérance clinique et biologique. L'ACV existe sous forme orale, intraveineuse, ou en pommade ophtalmique. La biodisponibilité par voie orale de l'ACV est modeste (de l'ordre de 15 à 30%) et très sensible au bol alimentaire [24]. Pour y remédier, le **valaciclovir** (VACV) a été développé par ajout d'une valine sur le noyau de l'aciclovir, qui est désesterifiée lors du passage du système digestif vers le sang. Cette propriété augmente la biodisponibilité après ingestion orale, mais c'est finalement de l'ACV qui passe dans la circulation systémique. L'ACV et le VACV ont prouvé leur efficacité curative clinique pour réduire la durée des poussées oculaires et leurs conséquences [25]. Donnée à titre préventif, l'ACV (et le VACV par extension) permet de diviser par deux la fréquence des récurrences herpétiques [26].

Le **ganciclovir** (GCV) est un autre analogue nucléosidique dont l'activité antivirale repose également sur une phosphorylation par la TK virale. Dans le cadre des kératites herpétiques, Il est utilisé par voie topique, dans le traitement des formes épithéliales de kératite herpétique.

La **trifluridine** est un analogue pyrimidique qui inhibe l'ADN polymérase de façon compétitive, mais ne nécessite pas de phosphorylation par la TK virale. Elle est donc active contre les virus porteurs de mutations sur la TK (**cf. 1.3.4**). Sa toxicité, liée à sa faible spécificité pour les cellules infectées, limite son utilisation au traitement topique des kératites herpétiques épithéliales.

### 1.3.2 Inhibiteurs non nucléosidiques de l'ADN polymérase virale

Ils sont utilisés en seconde ligne, en raison de leur toxicité potentielle. Ils permettent de traiter les patients dont le virus porte des mutations de résistance sur le gène de la TK virale (**cf. 1.3.4**).

Le **foscarnet** est un analogue du pyrophosphate qui inhibe la polymérase de nombreux herpesvirus. Il est utilisé par voie intraveineuse dans les formes sévères et/ou résistantes d'atteinte oculaire herpétique [23].

Le **cidofovir** est un analogue nucléotidique possédant un large spectre antiviral, sa toxicité rend exceptionnelle son utilisation pour les atteintes oculaires herpétiques [23].

### 1.3.3 Inhibiteurs du complexe hélicase primase

Les inhibiteurs du complexe hélicase-primase (IHP) agissent en empêchant la fixation du complexe IHP sur l'ADN viral, inhibant ainsi son déroulement et son positionnement et au final la réplication de l'ADN [23]. Plusieurs IHP sont en cours de développement, le plus avancé étant le



**pritélivir**. Ce dernier s'est révélé efficace dans un essai de phase 2 pour réduire la durée d'excrétion et la durée des épisodes cliniques d'herpès génital lié à HSV2 [27]. Bien qu'actif sur HSV-1, il n'existe aucun résultat clinique disponible concernant l'emploi du pritélivir dans les atteintes liées à HSV-1.

### **1.3.4 Malgré ces différentes possibilités, le traitement des atteintes oculaires herpétiques est limité par trois facteurs :**

#### 1) Une pharmacologie défavorable :

Le caractère avasculaire de la cornée rend difficile la pénétration, après administration systémique, du médicament sur le site même de l'infection, surtout quand elle concerne les couches profondes de la cornée (peu de passage via les larmes ou l'humeur aqueuse).

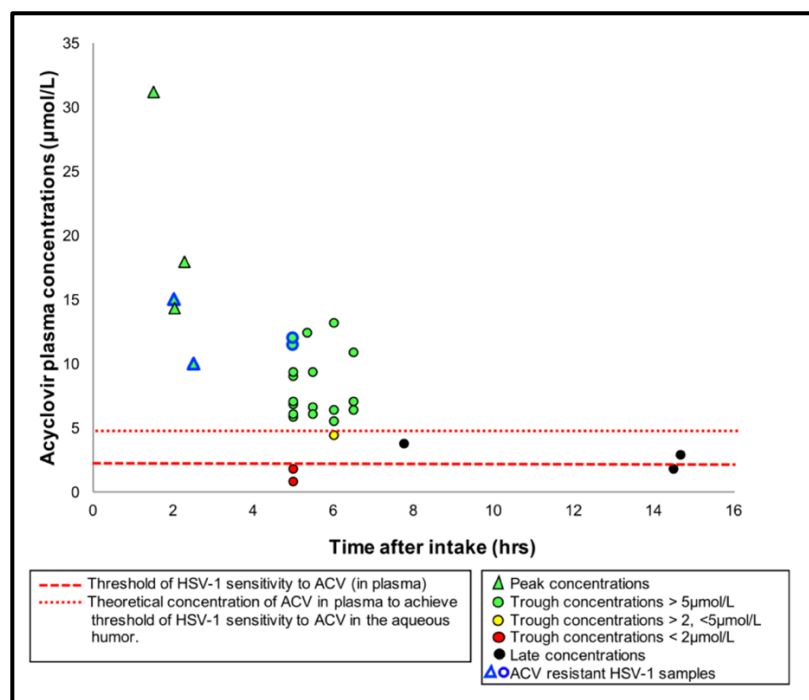
#### 2) L'apparition de résistances à l'ACV, favorisées par le traitement prophylactique :

Ce phénomène pourrait être lié à l'utilisation de plus en plus fréquente d'ACV et de VACV, notamment dans le traitement préventif des atteintes oculaires d'origine herpétique. La fréquence des souches biologiquement résistantes semble augmenter de manière préoccupante. En 2008, sur des prélèvements effectués sur 173 patients immunocompétents atteints de kératites herpétiques, Duan *et al.* retrouvaient 6% d'isolats résistants à l'ACV [28]. Plus récemment, van Velzen *et al.* analysaient la proportion de virus résistants dans des isolats issus de prélèvements oculaires de 78 cas de kératites herpétiques. Les isolats étaient considérés comme résistants à l'ACV si >28% des souches virales constituant les isolats étaient résistants. Au total, et selon cette définition, 26% des isolats étaient résistants à l'ACV. La prise d'un traitement prophylactique au cours des 12 derniers mois constituait le facteur de risque principal de l'apparition de telles résistances [29]. Dans un autre travail sur des patients atteints d'uvéïte herpétique, les mêmes auteurs retrouvaient des souches d'HSV-1 résistantes à l'ACV dans l'humeur aqueuse, avec dans certains cas des résistances croisées au GCV [30].

Nous avons participé à 2 études menées par le service d'Ophtalmologie du CHU de Bicêtre, en collaboration avec les services de virologie du CHU Pitié-Salpêtrière (Centre National de Référence Herpèsvirus) et du CHU Paul Brousse sur les résistances des kératites herpétiques aux traitements par ACV/VACV.



Dans l'étude KRAVIR 1 [31], nous avons inclus des patients qui présentaient des récurrences malgré un traitement prophylactique bien conduit. Les patients avaient dans un premier temps : i) un interrogatoire complet évaluant leur compliance au traitement et ii) un prélèvement oculaire (larmes, grattage épithélial ou humeur aqueuse) avec recherche par PCR d'HSV-1 et VZV, et recherche génotypique de résistance (par séquençage des gènes de la Thymidine Kinase et de l'ADN polymérase [32]) en cas de prélèvement positif. Les patients recevaient ensuite une dose de charge de VACV puis un dosage de l'aciclovirémie plasmatique était réalisé, au pic ou à la vallée de la concentration. Sur les 43 patients inclus, 6 avaient une PCR positive pour HSV-1, dont 5 (83%), était lié à un virus résistant à l'ACV. La durée de la maladie oculaire herpétique était significativement plus importante chez les patients porteurs de virus résistants. Les problèmes de compliance ne concernaient que 5% des patients. Concernant les dosages plasmatiques, ils étaient sous le seuil habituel de sensibilité à l'ACV d'HSV-1 dans près de 10% des cas (**Figure 3**).



**Figure 3 :** Concentrations plasmatiques d'ACV des patients de l'étude KRAVIR 1, d'après [31]. Les triangles représentent les concentrations au pic et les cercles à la vallée. La ligne en tiret représente la concentration efficace 50% au-delà de laquelle les souches d'HSV-1 sont considérées comme résistantes (2µmol/L). La ligne en pointillé représente la concentration plasmatique théoriquement requise pour obtenir une concentration de 2µmol/L dans l'humeur aqueuse (5µmol/L). Les formes entourées en bleu désignent les échantillons des patients avec des souches résistantes à l'ACV.



**Dans l'étude KERA VIR 2** (manuscrit en préparation, résultats présentés lors du congrès de l'*European Association for Vision and Eye Research / EVER*, à Nice, en octobre 2018, [33]), nous avons étudié les données virologiques et cliniques des cas de kératites herpétiques récidivantes avec isolement d'une souche d'HSV-1 résistante à l'ACV (résistance génotypique). Nous avons comme base initiale les données virologiques du service de virologie de la Pitié-Salpêtrière, et récupérons ensuite les données cliniques auprès des différents centres prescripteurs. Sur les 18 cas inclus, la durée de la maladie oculaire herpétique (durée entre le premier épisode et le diagnostic de résistance) était de  $29,8 \pm 20,4$  années, avec plus de 10 récurrences chez 15 patients (83%). La recherche de résistance était motivée par des récurrences malgré un traitement préventif bien conduit dans 13 cas (72%) et par une résistance au traitement curatif dans 5 cas (28%). La résistance à l'ACV était liée à une mutation du gène de la TK dans 15 cas (83%) et de l'ADN polymérase dans 3 cas (17%). Chez les patients immunocompétents (N=12, 67%), le nombre de récurrences précédant le diagnostic de résistance était significativement plus important que chez les patients immunodéprimés ( $16 \pm 3,5$  versus  $11 \pm 6$  versus  $p < 0,05$ ). Ces résultats suggèrent d'une part que les résistances se développent après de nombreuses années et un nombre important de récurrences (donc une exposition importante aux traitements préventifs et curatifs) et d'autre part que l'immunodépression favorise la sélection de souches résistantes, comme c'est le cas dans d'autres pathologies liées à HSV-1 [34].

### 3) L'impossibilité de traiter efficacement les greffons cornéens :

La greffe de cornée réunit à elle seule trois facteurs majeurs de réactivation de HSV-1 : traumatisme chirurgical important avec section de l'ensemble des nerfs cornéens sur 360°, réaction inflammatoire, immunodépression locale induite par les collyres aux corticoïdes et/ou à la ciclosporine prescrits dans la période post-opératoire. Or, on sait aussi que 10% à 40% des greffons de banque hébergent du génome du virus HSV-1, conséquence possible d'une excrétion oculaire asymptomatique de virions d'HSV-1 [35] et/ou d'une hypothétique latence cornéenne [36]. Plusieurs auteurs ont ainsi démontré la transmission d'une infection à HSV-1 au receveur d'une greffe de cornée par l'intermédiaire d'un greffon cornéen infecté [37-40]. L'ensemble de ces données souligne le risque majeur d'infection précoce du greffon dans les suites d'une transplantation.



D'ailleurs, dès 1995, Mietz *et al.* avaient évoqué le rôle possible de l'herpès dans l'échec précoce des greffes de cornée, en retrouvant le virus dans des greffons n'ayant jamais récupéré leur transparence après l'intervention, alors même qu'il n'y avait pas eu de suspicion clinique de maladie herpétique oculaire [41]. Cockerham *et al.* ont ensuite démontré la présence de génome d'HSV-1 dans 33% des greffons en situation d'échec primaire de la greffe [42]. Au total, les récurrences herpétiques surviennent sur près d'un greffon sur 2 dans les suites d'une transplantation [43], avec une survie du greffon en cas de récurrence de l'ordre de 20% à 5 ans [44].

Pour résumer, ces données indiquent d'une part qu'une proportion importante de rejet ou d'échec de greffe est liée au virus HSV-1, et d'autre part que le greffon peut lui même être un vecteur de l'infection. Dans tous les cas, l'infection des greffons peut survenir de façon rapide après le geste et mettre en danger le pronostic fonctionnel du tissu transplanté, voire être impliquée dans les mécanismes de rejet de greffe [38 41 42].



## 2 Les Herpesviridae et le virus HSV-1

### 2.1 Les *Herpesviridae*

Les *Herpesviridae* sont des virus ubiquitaires, enveloppés, à ADN double brin. Ils peuvent infecter la majorité des espèces animales. Tous les *Herpesviridae* partagent au moins quatre propriétés biologiques: i) La nécessité d'une machinerie enzymatique complexe pour le déroulement du cycle réplcatif, ii) L'assemblage de la capsid virale dans le noyau, iii) l'effet cytopathogène lié au cycle réplcatif, iv) La capacité à entrer en latence dans certaines cellules de l'hôte [45].

Les *Herpesviridae* sont divisés en trois sous-familles, en fonction de leur taille, de la structure de leur génome, de leur tropisme cellulaire et de leurs conditions de culture *in vitro* :

- **Les *Alphaherpesvirinae*** ont un large spectre d'hôte, un cycle réplcatif très court, diffusent très rapidement en culture, lysent efficacement les cellules infectées, sont pour la plupart neurotropes et ont la capacité d'entrer en latence dans les neurones sensitifs. Deux genres d'*Alphaherpesvirinae* sont impliqués en pathologie humaine : les *Simplexvirus* (HSV-1 et 2) et les *Varicellovirus* (VZV).

- **Les *Betaherpesvirinae*** ont un spectre d'hôte étroit, un cycle réplcatif lent, une croissance lente en culture et un effet cytopathogène de type cytomégalique. Ils établissent leur latence dans les cellules des glandes sécrétoires, les cellules lymphocytaires et le foie. Les *Betaherpesvirinae* isolés chez l'humain, sont le CMV, HHV-6 et HHV-7.

- **Les *Gammaherpesvirinae*** sont caractérisés par un spectre d'hôte étroit et un cycle réplcatif lent. Ils entrent en latence dans les lymphocytes B ou T. Les *Gammaherpesvirinae* isolés chez l'humain, sont EBV et HHV-8 [46].

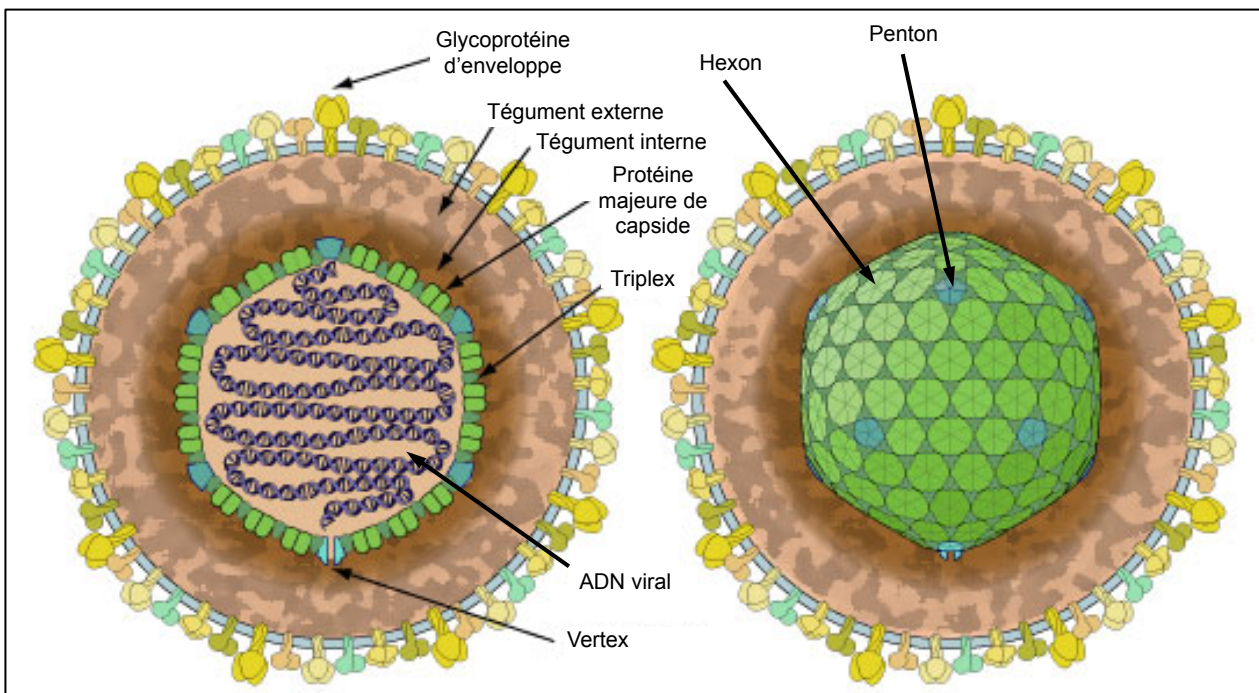
### 2.2 HSV-1 : structure

Le virion 180 à 220nm de diamètre. **L'enveloppe**, d'origine cellulaire, est formée lors de l'exocytose des particules virales. Elle porte les glycoprotéines virales qui jouent un rôle essentiel dans l'infection et le cycle viral. **Le tégment** est constitué d'une vingtaine de protéines (dont VP16, essentielle à l'initiation de la réplcation, voire de la réactivation) et d'ARN messagers (ARNm).





La **capside**, icosaédrique, est formée de 162 capsomères constitués de protéines (la protéine majeure et les protéines mineures) [46] organisées en pentons et en hexons [47] (**Figure 4**).

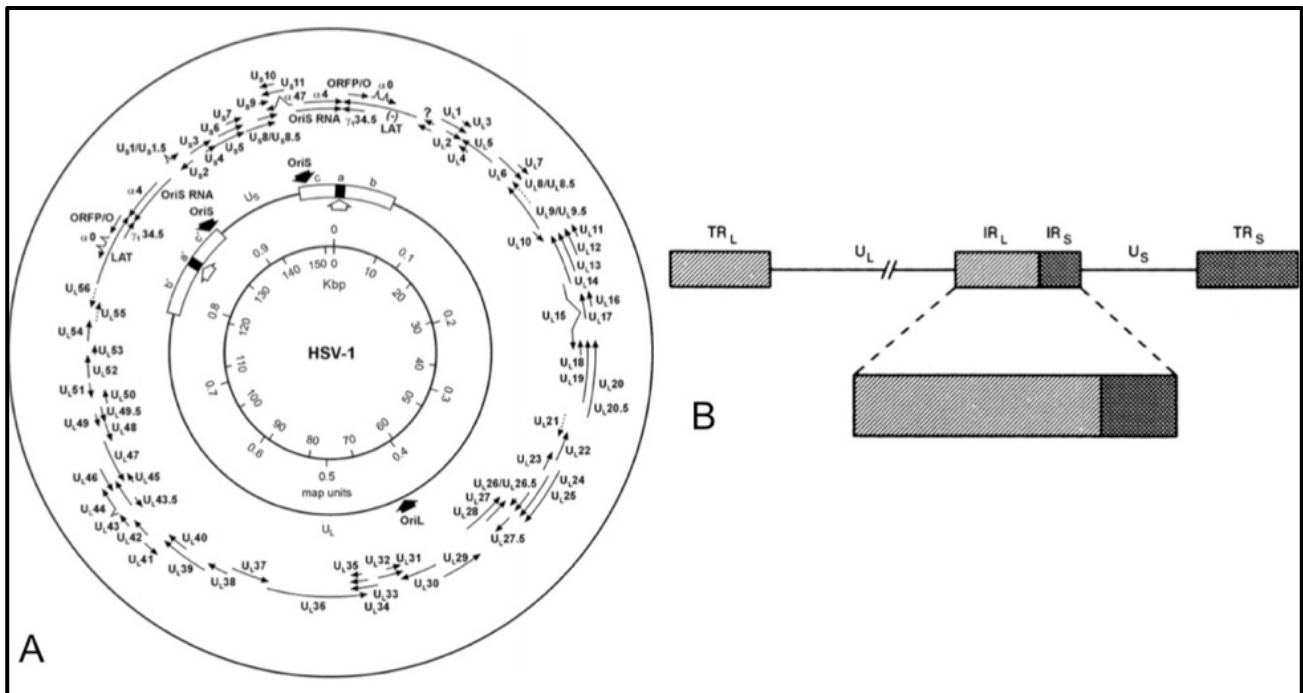


**Figure 4** : Représentation schématique d'un virion d'Herpès simplex virus. Reproduit et modifié d'après [48].

**Le génome** d'HSV-1 est composé de 152 000 paires de base, avec un taux de GC (proportion de bases étant soit une guanine, soit une cytosine) élevé (68%). Il est constitué d'une région unique courte ( $U_S$  pour *Unique Short*), d'une région unique longue ( $U_L$  pour *Unique Long*) et de séquences inversées répétées ( $TR_L$  et  $IR_L$ ,  $IR_S$  et  $TR_S$  pour *Terminal* ou *Inverted Repeat short et long*), présentes en deux exemplaires dans chaque génome. Le génome peut ainsi être retrouvé sous quatre formes isomériques distinctes, en quantités équivalentes, du fait des inversions relatives des fragments  $U_L$  et  $U_S$ . Les deux brins d'ADN ont une capacité de codage. Le génome d'HSV-1 code une centaine d'ARNm dont plus de 80 codent des protéines identifiées [46] (**Figure 5**).

Concernant la nomenclature, les protéines codées par les gènes d'HSV-1 sont nommées selon leur fonction, quand elle est connue, ou selon leur emplacement sur le génome. A titre d'exemple, la TK virale peut aussi être dénommée UL23.





**Figure 5** : A) Représentation du génome d'HSV-1. (D'après Roizman *et al.* [49]). B) Schéma simplifié représentant le génome de façon linéaire. U<sub>L</sub> et U<sub>S</sub> désignent les séquences uniques longues et courtes. TR et IR représentent les séquences inversées répétées (D'après Liesegang *et al.* [50]).

## 2.3 HSV-1 : Cycle réplcatif

HSV-1 est capable d'infecter et de se multiplier dans de nombreux types cellulaires, en particulier les cellules épithéliales et les neurones, mais également certaines populations du système immunitaire.

### - Fixation à la membrane cellulaire :

Parmi les 12 glycoprotéines d'enveloppe, 6 jouent un rôle majeur dans l'entrée du virus dans la cellule (gC, gD, gB, gH, gK, gL). Les glycoprotéines gC et gB sont impliquées dans la liaison du virus à la cellule, gD, gB, gH, gL sont requises pour la fusion membranaire permettant l'entrée du virus dans la cellule. Dans un premier temps, HSV-1 interagit de manière réversible avec les résidus héparanes sulfates présents à la surface cellulaire via gB et gC. Le rôle de la protéine gK pour l'entrée dans la cellule a été démontré récemment. [51].

Dans un second temps, gD se fixe sur d'autres récepteurs membranaire (HVEM pour *Herpesvirus Entry Mediator*, nectine 1 et nectine 2), ce qui induit des changements conformationnels déclenchant la fusion des membranes virales et cytoplasmiques.



#### - Fusion des membranes et pénétration intracellulaire :

Le changement de conformation de gD entraîne la fixation de gB et de l'hétérodimère gH-gL. Ce complexe induit ensuite la fusion des membranes virales et cytoplasmiques, puis la libération de la capside dans le cytoplasme. Toutefois, le mécanisme d'entrée d'HSV-1 dans les cellules dépend du type cellulaire et peut également avoir lieu par macropinocytose [52].

#### - Transport de la capside et libération de l'ADN viral dans le noyau :

Après pénétration intracellulaire, la capside et certaines protéines du tégument (VP16 et VHS, pour *viral host shutoff*) sont transportées jusqu'aux pores nucléaires par les microtubules et le cytosquelette. Le complexe UL36/UL37, contenu dans le tégument interne, permet le transport et l'orientation des capsides [53], notamment dans les axones des neurones infectés. La capside se fixe ensuite au pore nucléaire puis libère l'ADN viral dans le noyau. L'ADN se circularise et se localise au niveau des corps nucléaires PML ou (PML-NB pour *Promyelocytic Leukemia-Nuclear Body*, parfois retrouvés sous le terme ND10) [54], habituellement associés à une répression des séquences géniques situées dans leur environnement [55]. Cependant, au cours de la phase de réplication et en début de réactivation, la protéine ICP0 de HSV-1 induit la transcription du génome viral en activant la dégradation PML-NB et des protéines sp100 [54] (jouant un rôle essentiel dans la répression de la transcription, que nous verrons plus en détail en 2.6) permettant ainsi l'enclenchement de la cascade de réplication.

#### - Transcription du génome et traduction des transcrits :

La transcription du génome viral suit une séquence rigoureusement régulée. Les protéines immédiatement précoces (IE pour *Immediate Early*, ou  $\alpha$ ) sont synthétisées les premières, suivies des protéines précoces (E pour *Early* ou  $\beta$ ) puis tardives (L pour *Late*, ou  $\gamma$ ). L'expression des gènes IE commence dès la deuxième heure de l'infection. Il existe 5 protéines IE : ICP0, ICP4, ICP22, ICP27, ICP47 (ICP pour *Infected Cell Polypeptide*) [56]. Les promoteurs des gènes IE ont tous la séquence TAATGARAT en amont du site de coiffe, reconnue par le facteur de transcription cellulaire Oct1 (*Oct pour Octamer binding protein 1*) [46]. Le complexe Oct1/ADN viral est ensuite reconnu par le complexe réunissant la protéine de tégument VP16 (*Viral Protein 16*) et le facteur cellulaire HCF1 (*Host Cellular Factor*). Cette liaison induit la transcription des gènes IE. Quatre des 5 protéines IE



sont des protéines transactivatrices qui agissent au niveau transcriptionnel ou post-transcriptionnel pour contrôler l'expression des gènes E et L. ICP0 et ICP4 sont des **activateurs majeurs** de l'expression des gènes d'HSV-1. ICP27 agit en inhibant la maturation des ARN cellulaires. ICP22 est requise pour une réplication efficace dans certains types cellulaires, elle modifie l'ADN polymérase II cellulaire et optimise l'expression d'ICP0. L'expression des gènes E atteint son maximum entre 5 et 7 heures après l'infection. Les transcrits des gènes E ne sont produits qu'en présence d'une quantité importante de protéines IE. Les protéines E sont majoritairement impliquées dans la réplication de l'ADN viral (UL30 : domaine catalytique de l'ADN polymérase virale, UL42 : facteur de processivité de l'ADN polymérase virale, UL29 : protéine de liaison à l'ADN). Certaines contrôlent le métabolisme des nucléotides (UL23 : TK, UL39/40 : ribonucléotide réductase). La réplication virale ne débute que lorsque le taux de ces protéines est suffisant dans la cellule [57]. Les protéines L sont principalement impliquées dans la structure du virion, il s'agit en particulier des protéines de capsid, de matrice et des glycoprotéines de surface.

#### - Réplication de l'ADN viral :

La réplication de l'ADN viral débute à partir de la troisième heure après l'infection et se produit jusqu'à 12 heures post-infection, le maximum ayant lieu tardivement après l'infection.

Le génome d'HSV-1 contient 3 origines de réplication [57] (**Figure 5**). Deux origines de réplication  $oris_1$  et  $oris_2$  sont situées respectivement entre les gènes codant ICP4 et ICP22 et les gènes codant les protéines ICP4 et ICP47, dans les séquences répétées inversées  $IR_S$ , c'est à dire assez proche du gène codant pour ICP0. La 3<sup>ème</sup> origine de réplication ( $ori_L$ ), est localisée dans le milieu de la séquence UL entre les gènes codant pour l'ADN polymérase et la protéine ICP8. La fonctionnalité de ces 3 origines de réplication n'est pas complètement connue. Sept gènes viraux (UL5, UL8, UL9, UL29, UL30, UL42, UL52) sont essentiels pour la synthèse de l'ADN viral *in vitro* [58]. Le gène UL9 code pour une protéine capable de se lier aux origines de réplication, celle-ci recrute ICP8, codée par UL29. A ce couple, se fixe le complexe hélicase/primase (UL5, UL8 et UL52) qui va séparer les 2 brins d'ADN. La synthèse est alors réalisée par l'ADN polymérase, hétérodimère formée d'UL30 (domaine catalytique) et UL42 (facteur de processivité). La sous-unité UL30 possède une activité exonucléase 3'-5' permettant une réplication haute fidélité. En premier



lieu, l'ADN polymérase initie des cycles de réplication bidirectionnels en mode  $\theta$  puis en cercles roulants conduisant à la formation de concatémères, qui seront clivés lors de l'encapsidation.

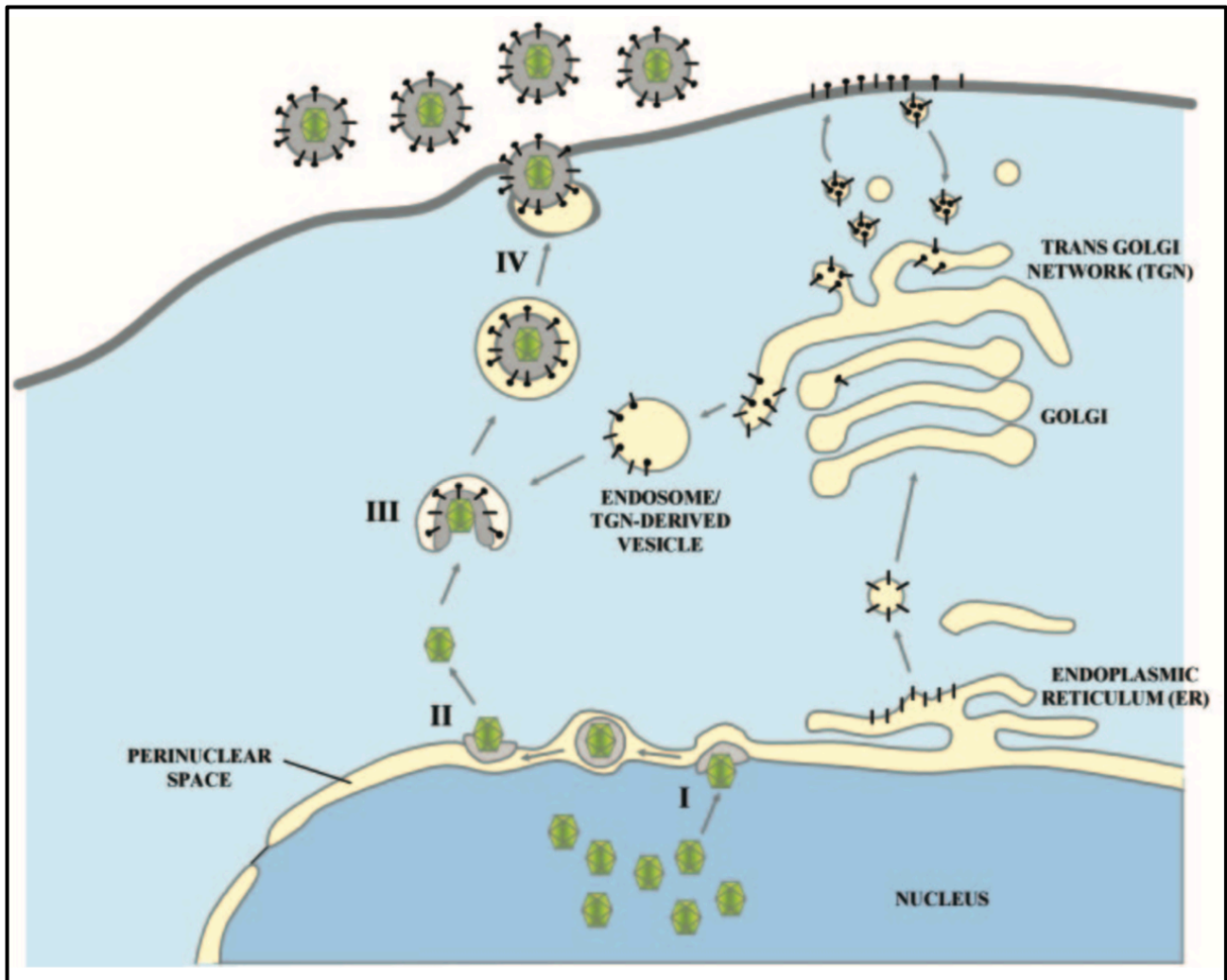
- Assemblage des capsides et empaquetage de l'ADN viral :

Ils ont lieu de façon concomitante dans le noyau des cellules infectées. L'assemblage de la capside virale requiert la protéine majeure de capside VP5, les trois autres protéines de capside et la protéine d'échafaudage nécessaire pour l'assemblage, mais absente de la capside mature. Le complexe VP5-protéine d'échafaudage se lie aux autres protéines pour former des sous-unités qui s'assemblent en pro-capside. La maturation de la pro-capside passe par le clivage de la protéine d'échafaudage, le clivage de l'ADN concatémérique au niveau des séquences TR<sub>L</sub> et son empaquetage dans la capside.

- Sortie des capsides du noyau, transport à la membrane plasmique et bourgeonnement :

Les capsides fusionnent ensuite avec l'enveloppe nucléaire externe ou le réticulum endoplasmique puis sont libérées nues, dans le cytoplasme. Elles sont ensuite ré-enveloppées lors du bourgeonnement avec les vésicules de l'appareil de Golgi et transportées jusqu'à la membrane plasmique avec laquelle elles fusionnent pour libérer les particules infectieuses matures (**Figure 6**). Elles sont ensuite libérées dans l'espace extracellulaire par exocytose. Il est classique de considérer que la sortie des virions provoque la lyse de la cellule infectée, mais ces données sont discutées, notamment en ce qui concerne les neurones (site de la latence).





**Figure 6, d'après [59]** : Représentation schématique de la formation des virions et de leur sortie. I) Les capsides matures bourgeonnent dans l'espace péri-nucléaire. II) Elles sont libérées, nues, dans le cytoplasme, puis III) ré-enveloppées par fusion avec des vésicules cytoplasmiques. IV) Sortie dans l'espace extracellulaire.

## 2.4 HSV-1 : latence et réactivation

HSV-1 induit chez l'homme une infection persistante qui alterne entre phases de latence et de réactivation.

- *La latence* virale se définit par la présence du génome viral dans la cellule, sans production de nouvelles particules infectieuses. Dans le cas particulier d'HSV-1, le génome est sous forme épisomale, c'est à dire un ADN double brin extra-chromosomique circulaire, associé à des nucléosomes, majoritairement en état d'hétérochromatine. On considère classiquement que lors de la latence, aucun produit de gène viral (ARN ou protéine), n'est synthétisé en quantités significatives, à l'exception des transcrits associés à la latence (ou LAT pour *Latency Associated Transcripts*). Il existe cependant un certain niveau de production d'autres transcrits, majoritairement



immatures, pendant la période de latence [60 61]. Contrairement à l'infection productive, l'infection herpétique latente n'a jusqu'à présent été détectée que dans les neurones, en particulier ceux des ganglions sensitifs. Concernant HSV-1, on sait depuis les années 60-70 que la latence a essentiellement lieu dans les TG [62].

- *La réactivation* se caractérise par une production rapide de virus dans le ganglion sensitif qui héberge le virus en latence. La réactivation peut avoir lieu spontanément ou sous l'influence de stimuli tels que le froid, l'immunodépression (et notamment l'exposition aux corticoïdes), les traumatismes, l'inflammation et les rayonnements ultraviolets. La probabilité de réactivation semble corrélée au nombre de copies de génomes présent dans le noyau des neurones hébergeant le virus [63].

Les mécanismes d'établissement et de maintien de la latence ainsi que de la réactivation herpétique sont encore incomplètement compris, nous détaillerons ci-dessous les concepts actuellement admis pour comprendre ces phénomènes.

### **2.4.1 Latence**

L'infection latente permet au virus de persister dans les noyaux des neurones sensitifs, tout en étant à l'abri du système immunitaire de l'hôte, avant d'engager une période de réactivation, source de contamination potentielle d'un nouvel hôte.

#### **2.4.1.1 Établissement de la latence**

Après son entrée dans les neurones sensitifs, le virus peut engager un cycle lytique (qui pourra conduire à une infection latente ultérieure), ou entrer directement en latence. Les mécanismes biologiques exacts participant à la mise en place de l'infection latente restent incomplètement élucidés, de même que ceux concourant au maintien de cet état.

L'entrée en latence pourrait résulter de l'absence d'expression des gènes viraux, ou de l'expression à un niveau insuffisant de gènes IE pour activer les gènes viraux ultérieurs (E et L). Cette régulation serait notamment liée à la disponibilité des facteurs de transcription cellulaire dans le site de latence de HSV-1. En effet, les facteurs de transcription cellulaires (c-jun, c-fos, et Oct-1) nécessaires à l'expression des gènes viraux IE sont absents ou présents en très faible quantité dans les neurones [64 65]. A l'inverse, ces cellules expriment d'autres facteurs de transcription (Oct-2, et



N-Oct-3) qui pourraient entrer en compétition pour la liaison avec VP16 sur le complexe Oct-1/TAATGARAT [66]. L'absence ou la diminution de l'efficacité de VP16 entraînerait une diminution des niveaux d'expression d'ICP0 et d'ICP4, indispensables à l'initiation de l'infection lytique. En outre, HCF1 (*Host Cell Factor 1*), protéine cellulaire indispensable pour l'expression des gènes IE, est localisée dans le cytoplasme des neurones sensitifs, et n'est transportée dans le noyau que sous certaines conditions de stress [67]. HCF1 étant responsable de l'import nucléaire de VP16, il est possible que VP16 ne pénètre pas (ou très peu) dans le noyau des neurones infectés [68]. Il en résulte que le complexe VP16/Oct-1/HCF1 ne peut se former, ce qui conduit à l'absence d'expression des gènes IE et à l'établissement de la latence au sein de ces neurones.

#### 2.4.1.2 Régulation épigénétique de la latence

Contrairement à ce qui se produit chez certains membres des *Beta* et *Gammaherpesvirinae*, l'expression des gènes lytiques pendant la latence des *Alphaherpesvirinae* n'est pas régulée par la méthylation de l'ADN [69 70]. Dans le cas particulier d'HSV-1, cette régulation se fait notamment par des modifications post-traductionnelles sur les histones, placés à des positions clefs sur les promoteurs de gènes viraux.

**Pendant la phase lytique**, la présence de VP16 dans le noyau conduit au recrutement de facteurs remodelant les histones situées sur les promoteurs des gènes IE (ICP0, ICP27...). Ces histones sont associées à des marqueurs d'euchromatines (acétylation des histones H3 sur les résidus K9 et K14, di- et tri-méthylation des résidus K4) [69 71-73], favorables à une activité transcriptionnelle.

**Pendant la latence**, le domaine LAT est la seule région du génome de HSV-1 enrichie en marqueurs d'euchromatine [74]. L'expression du LAT promeut l'assemblage de marques d'hétérochromatine sur les histones situées sur les promoteurs des gènes IE (di et tri-méthylation sur K9, tri-méthylation sur K27). Les promoteurs des gènes lytiques, et plus particulièrement le promoteur d'ICP0 et d'UL30 (codant pour le site catalytique de l'ADN polymérase), sont également pauvres en marqueurs d'euchromatine [69 71], et riches en marques d'hétérochromatines constitutives et facultatives [73 75], impliquant une répression de leur transcription.



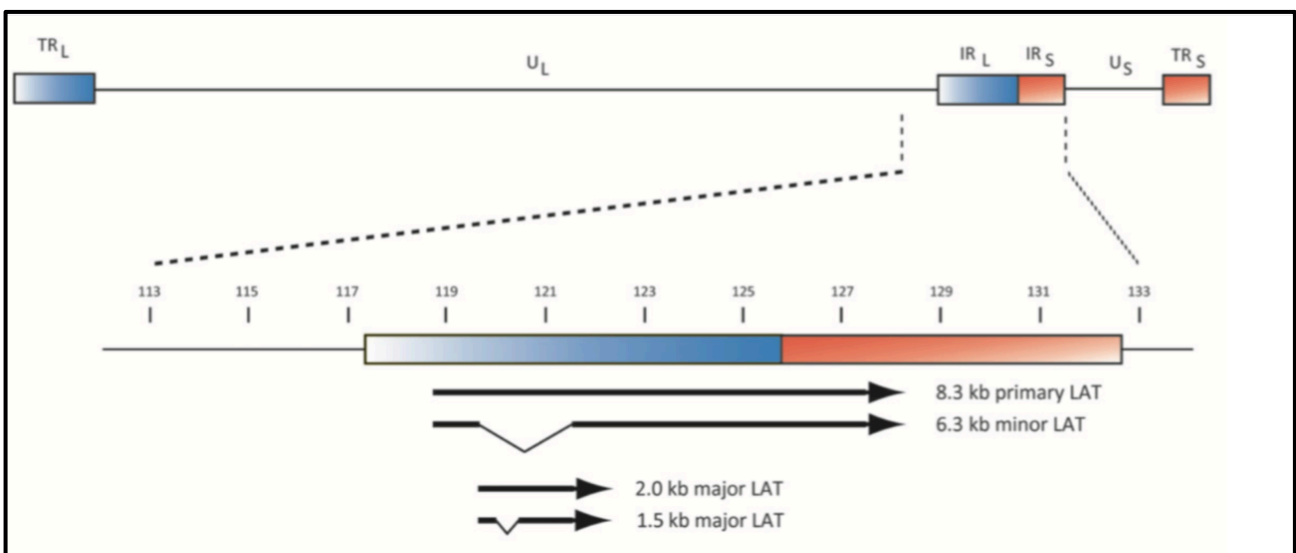


Ainsi, bien que plusieurs transcrits viraux soient produits lors de l'infection latente, leur taux d'expression est très faible et ne permet pas de production de particules virales infectieuses. Seuls les LAT s'accumulent abondamment dans le noyau des neurones infectés. Nous détaillerons plus loin (cf. 2.4.1.3.2) comment les LAT exercent une régulation épigénétique de l'expression des gènes lytiques.

### 2.4.1.3 Les LAT (*Latency Associated Transcripts*)

#### **Formation et structure**

L'importance des LAT dans la balance latence / réactivation a été évoqué dans de nombreux travaux, sans toutefois que le mécanisme central de la régulation ne soit complètement élucidé. Le gène codant pour les LAT sont à l'origine d'un premier transcrit de 8,3 kb, rapidement épissé pour générer le LAT2kb (intron résultant de l'épissage, **Figure 7**). Sa stabilité inhabituelle dans une structure en lasso (lariat) est expliquée par la présence d'une séquence non consensus au site de branchement [76]. Un mécanisme d'épissage alternatif aboutit aussi au LAT1,5kb, de structure semblable au LAT2kb. Si ce dernier peut être produit dès la phase de réplication active et dans toutes les cellules, le LAT1,5kb n'a jusqu'à présent été observé que dans les neurones pendant la période d'infection latente.



**Figure 7, d'après [77]** : Organisation schématique du génome de HSV-1 au niveau du locus LAT, d'après. Le gène codant les LAT est à l'origine d'un transcrit primaire instable de 8,3kb, qui s'épisse pour générer un intron stable, le LAT2kb ou le LAT1,5kb.



## **Fonctions des LAT**

Si les LAT ne sont pas essentiels pour l'établissement de l'infection latente, son maintien ou la réactivation virale, des études *in vivo* ont montré que les virus mutants LAT- présentent une capacité réduite d'établir la latence et de réactiver [78 79], et l'intervention des LAT dans plusieurs aspects de l'infection latente a été bien démontrée. Plus précisément, les LAT sont associés : i) à la régulation de l'apoptose, ii) à la modulation de l'immunité de l'hôte, iii) au maintien de l'infection latente en agissant comme précurseurs de miARN et iv) à la régulation épigénétique de l'expression des gènes lytiques.

### - Régulation de l'apoptose

Les mutants LAT- ont une capacité diminuée à entrer en latence et à se réactiver, ainsi qu'une majoration de la neuro-virulence, en comparaison aux souches sauvages [79]. Les LAT joueraient donc un rôle dans la neuroprotection lors de l'infection aiguë, qui pourrait être liée à leurs fonctions de régulation de l'apoptose. En effet, les LAT inhibent l'apoptose *in vitro* (protection de l'apoptose des cellules transfectées avec le gène du LAT) mais également *in vivo* (neuroprotection dans les TG de souris et de lapin) [80-82]. L'expression des LAT est capable d'inhiber les caspase 8 et caspase 9 induites lors de l'apoptose, mais également plusieurs composants de la voie JAK/STAT (*Janus kinase / STAT*) impliqués dans l'apoptose [80 82 83]. Cette fonction anti-apoptotique du LAT favorise la survie des neurones infectés lors de la phase aiguë, et permet ainsi d'augmenter le nombre de neurones infectés de façon latente ainsi que la capacité de réactivation des virus latents.

### - Modulation de l'immunité de l'hôte (cf. 4.3)

L'infection par HSV-1 s'accompagne d'une sélection de clones de lymphocytes T CD8<sup>+</sup> (LTCD8<sup>+</sup>) spécifiques résidant dans les TG infectés de façon latente, qui jouent un rôle clef dans le contrôle de la réactivation virale. Durant la latence, les LTCD8<sup>+</sup> retenus dans les TG de lapins infectés par une souche d'HSV-1 exprimant le LAT (LAT+) présentent une grande quantité de marqueurs d'épuisement tels que PD-1 (*programmed cell death-1*), TIM-3 (*T-cell immunoglobulin and mucin-domain containing-3*) et CTLA-4 (*cytotoxic T-lymphocyte antigen 4*) [84]. Ces marqueurs sont retrouvés en quantité plus faible dans les TG infectés par un virus LAT-. Ces LTCD8<sup>+</sup> épuisés



ont une diminution de leur capacité de cytotoxicité, de production d'IFN- $\gamma$  et de TNF- $\alpha$  [85]. En revanche, ils reconnaissent une plus large sélection d'épitopes viraux [84]. Les LAT permettent donc de construire un plus large répertoire de LTCD8<sup>+</sup> mais en contrepartie, ces LTCD8<sup>+</sup> spécifiques s'épuisent, et sont donc moins cytotoxique sur les neurones, mais plus « permissifs » pour les réactivations virales.

#### - Les LAT encodent des microARN (miARN) maintenant la latence

En effet, les LATs codent pour plusieurs miARN identifiés *in silico*, et dont l'expression a été confirmée *in vivo* (analyse à partir de TG de souris infectées de façon latente et de TG humains prélevés *post-mortem*) [86 87]. Ces miARN sont codés au sein du LAT primaire de 8,3kb. Des études *in vitro* ont montré que certains miARN de HSV-1 sont impliqués dans la diminution de l'expression de deux protéines virales IE : ICP0 et ICP4 [86], toutes deux considérés comme de puissants activateurs transcriptionnels. Leur répression par ces miARN pourrait faciliter l'établissement et/ou le maintien de la latence.

Les fonctions de ces miARN ont été étudiées *in vivo*. Pour cela, des souris ont été infectées avec des souches de HSV-1 délétées dans le promoteur du gène LAT. Kramer *et al.* constataient une réduction considérable de l'accumulation des miARN dérivés du LAT dans les TG de souris infectées à la phase de latence. Toutefois, ces souches mutantes se répliquaient de manière comparable au virus sauvage dans les tissus infectés et pouvaient établir une latence dans les TG [88]. Ces miARN ne semblent donc pas indispensables pour l'établissement de la latence.

#### - Régulation épigénétique de la latence et de l'expression des gènes lytiques

Comme vu plus haut, la latence et la réactivation sont régulées par des modifications épigénétiques dont certaines sont directement sous le contrôle des LAT.

En effet, en agissant comme un régulateur épigénétique de type ncARN (ARN non codant), les LAT remodelent la chromatine virale pour la maintenir dans un état répressif défavorable à la transcription. Ils sont impliqués dans la mise en place de modifications post-traductionnelles au niveau des histones, induisant ainsi la répression de l'expression de gènes lytiques [73 75]. Des études de l'infection latente dans **un modèle murin** ont montré que les virus HSV-1 mutants LAT- présentent une diminution de l'association d'hétérochromatine facultative et constitutive sur les



promoteurs des gènes lytiques. Le LAT faciliterait ainsi l'assemblage de l'hétérochromatine sur ces promoteurs lors de l'entrée en latence [73 75]. En outre, la comparaison de la capacité de réactivation d'une souche sauvage d'HSV-1 avec une souche délétée pour le promoteur du LAT révèle que l'expression du LAT limite la capacité de réactivation de HSV-1 (en plus de réduire sa capacité à entrer en latence), via un mécanisme de répression transcriptionnelle des gènes lytiques du virus [89].

En revanche, les études **sur le lapin** suggèrent un rôle opposé des LAT. En effet, chez le lapin, le LAT interagit avec le génome viral pour le maintenir dans un état transcriptionnel actif [90].

S'il semble clair que le LAT exerce un rôle important dans la régulation épigénétique de la latence virale, il est toutefois difficile de porter des conclusions définitives à partir de ces deux modèles, d'autant plus qu'HSV-1 est un pathogène humain strict (le lapin et la souris ne sont pas des hôtes naturels) (**cf. 2.5**).

#### - La balance latence/réactivation est dynamique

La répression de l'expression des gènes lytiques n'est pas absolue pendant la latence : des transcrits lytiques sont en effet retrouvés en faible quantité dans les ganglions sensitifs qui hébergent l'infection latente, tels que ICP0 [61], ICP4 [91] ainsi que ICP27, gD et ICP8 [92]. La traduction de ces transcrits lytiques n'a en revanche pas encore été détectée dans les ganglions sensitifs infectés de façon latente. La présence de nombreux LTCD8<sup>+</sup> activés spécifiques d'HSV-1, dans ces tissus, suggère que ces transcrits pourraient, au moins en partie, être traduits [93].

Les mécanismes expliquant la présence de transcrits lytiques dans les neurones infectés par le virus latent restent encore débattus. Ils pourraient être résiduels de réactivations complètes mais associées à une production virale trop faible pour être détectée [94], ou encore résulter de réactivations contrôlées par l'hôte [95]. Enfin, ils pourraient provenir d'une expression stochastique à bas bruit, mais continue, de gènes lytiques. Dans tous les cas, cela incite à définir la latence comme une balance dynamique entre un maintien par le système immunitaire de l'hôte et la réactivation « spontanée ». Kumar *et al.* ont d'ailleurs montré dans une étude portant sur 45 volontaires sains, sans antécédent herpétique labial ou oculaire, soumis à une recherche d'HSV-1 par PCR sur les larmes et la salive matin et soir pendant 30 jours, qu'un de ces 60 prélèvements



était positif dans 86% pour les larmes et dans 79% sur la salive, traduisant une excrétion asymptomatique épisodique, mais finalement fréquente... [35].

#### - La latence est hétérogène au niveau tissulaire

Au sein d'un même ganglion sensitif, le nombre de génomes viraux par neurone infecté varie de 1 à plus de 1000 copies, avec une moyenne de 10 à 100 copies de génome viral [96]. Cette disparité influence également la capacité de réactivation virale au sein de chaque neurone : les neurones hébergeant un plus grand nombre de copies de génome viral sont plus aptes à réactiver [97].

### 2.4.2 Réactivation

Sous l'influence de divers stimuli tels qu'une exposition aux rayonnements UV, la chaleur, les autres causes de stress neuronal, une baisse de l'immunité locale ou systémique, une inflammation locale, la latence (qui est définitive chez certains hôtes expérimentaux) peut être interrompue avec reprise du cycle réplcatif : c'est la réactivation. Il semble que le stress cellulaire soit essentiel pour initier l'expression des gènes d'HSV-1 au niveau du ou des neurone(s) au sein du(des)quel(s) se produit ce phénomène [98]. La reprise du cycle viral conduit à la synthèse de capsides virales matures qui sont transportées de façon antérograde le long des axones/dendrites jusqu'aux sites périphériques. Les virions sont alors libérés et se répliquent dans ces tissus périphériques, ce qui se traduit par la **récurrence**, qui est la traduction clinique de la réactivation (**Figure 1**).

Les mécanismes conduisant à la réactivation virale sont très différents de ceux d'une infection *de novo*, même si les conséquences *in fine* sont identiques, c'est-à-dire l'initiation de la phase lytique. La réactivation virale présente deux différences majeures en comparaison à l'infection *de novo*. Tout d'abord, le génome viral est associé à une structure chromatiniennne plus compacte, et de nombreuses modifications post-traductionnelles sont nécessaires pour permettre une dérépression de l'expression des gènes viraux [99]. De plus, les activateurs transcriptionnels provenant de facteurs du tégument, tels que VP16, sont absents. La réactivation repose donc sur des mécanismes alternatifs à ceux de l'infection *de novo*.

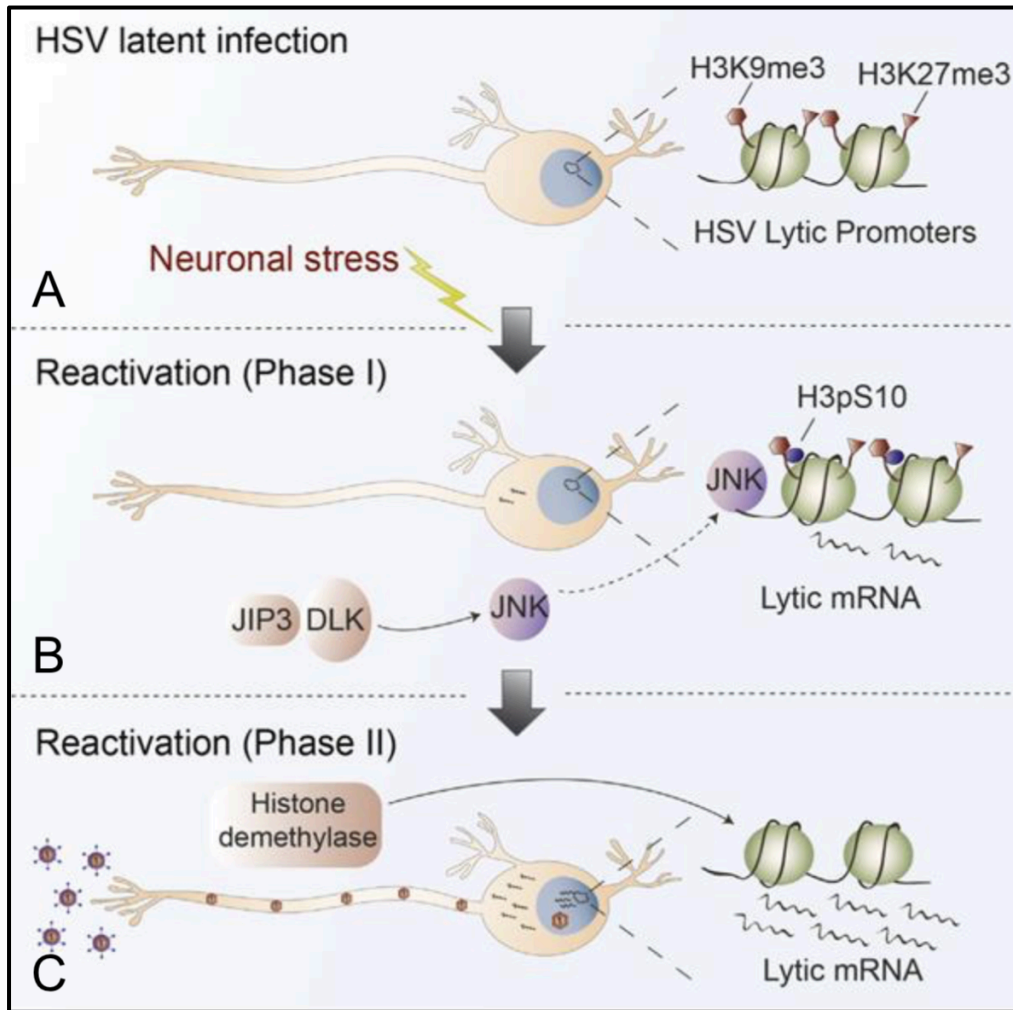


La réactivation virale se décompose en deux phases décrites grâce à des modèles *in vitro* (cf. 2.5.1) : la première phase, ou phase d'animation, correspond à la transcription simultanée des gènes IE, E et L sans qu'il y ait de réplication de l'ADN viral. Plusieurs protéines virales sont alors synthétisées, dont VP16 [100] (**Figure 8**). L'expression des gènes viraux lors de cette phase est indépendante de la présence de VP16 et peut s'effectuer en présence d'inhibiteurs d'histones déméthylases, ce qui indique que la transcription virale peut s'accomplir sans le retrait des modifications répressives sur les histones [98].

La phase suivante (dite de synthèse), est enclenchée lorsqu'une quantité suffisante de protéines virales est accumulée [100]. L'expression des gènes viraux est alors similaire à la cascade régulée de l'expression des gènes viraux observés lors de la primo-infection (**Figure 8**). La réplication du génome viral aboutit à la production de particules virales infectieuses. La phase de synthèse dépend de l'activité de VP16, et s'accompagne du remodelage de la chromatine sur le génome viral. La synthèse de VP16 *de novo* est indispensable pour l'initiation efficace de la reprise du cycle lytique dans les neurones lors de la réactivation [101]. Cette protéine virale joue un rôle de déclencheur de la réactivation sur un modèle murin, la protéine ICP0 étant quant à elle nécessaire pour la progression vers un cycle productif. VP16 et ICP0, sont d'ailleurs étroitement impliquées dans le remodelage de la chromatine. VP16 permet de recruter des remodeleurs de chromatines, tels que CBP et p300, sur les promoteurs viraux des gènes lytiques [102]. Elle a ainsi un rôle actif dans le relâchement de la structure chromatinienne sur les promoteurs des gènes lytiques.

ICP0 influe également sur la régulation de l'état de la chromatine virale. Cette protéine induit une perte des marques d'hétérochromatines (méthylation de H3K9) sur le génome viral. Elle est aussi associée à une augmentation des marques d'euchromatine (acétylation) sur les histones présentes au niveau des promoteurs des gènes lytiques [103]. L'interaction d'ICP0 avec des histones déacétylases [104] ainsi qu'avec des composants du complexe de répression transcriptionnelle CoREST/REST [105] induit une perte de l'activité inhibitrice de ces protéines cellulaires et une augmentation de l'activité transcriptionnelle virale.





**Figure 8, d'après [98]** : Les 2 phases de la réactivation, A) Latence : les promoteurs des gènes lytiques sont associés à des marques d'hétérochromatines (H3K9me3, H3K27me3), avec répression de leur transcription. B) Première phase de de réactivation : activation de la cJun N-terminal kinase (JNK). La JNK phosphoryle les histones sur les promoteurs des gènes lytiques. La dé-répression permet une transcription simultanée des gènes IE, E et L sans réplication de l'ADN viral. C) Seconde phase de la réactivation : remodelage de la chromatine par des histones déméthylases, conduisant à la transcription régulée des gènes viraux et *in fine* à la production de particules virales infectieuses.

## 2.5 Modèles d'études du cycle d'HSV-1

### 2.5.1 Modèles *in vitro*

La première modélisation *in vitro* de la latence d'HSV-1 a été effectuée sur des neurones des ganglions spinaux embryonnaires de rats [106]. Après culture dans un milieu contenant de l'ACV (visant à réprimer le cycle lytique) et infection *ex-vivo*, les neurones contenaient du génome d'HSV-1 sans particule virale infectieuse ni ARN de protéines de la phase lytique avec une accumulation nucléaire de LAT. Plus tard, 2 autres groupes ont mis au point des systèmes ayant les avantages de



i) permettre l'étude de populations neuronales pures, ii) la possibilité d'infecter quasiment toutes les cellules en culture et iii) de pouvoir servir de plateformes pour tester l'effet de petites molécules iv) de suivre l'alternance latence/réactivation de manière longitudinale.

Dans le premier, les neurones de ganglions spinaux embryonnaires de rats sont infectés en présence d'ACV [100]. Après quelques jours, les neurones restants présentent les caractéristiques d'une infection latente. C'est ce modèle qui a permis de montrer que la réactivation pouvait être envisagée en 2 phases, tel que nous l'avons vu plus haut [107].

Le second implique des neurones de TG murin, a l'avantage d'être plus représentatif des différents phénotypes de neurones sensitifs présents dans le TG humain [108] et ne nécessite pas l'utilisation d'ACV.

### **2.5.2 Modèles animaux : généralités**

Les expérimentations sur HSV-1 chez l'animal sont indispensables pour mieux comprendre la globalité des interactions complexes entre l'hôte et le virus, et ses implications dans l'alternance latence/ réactivation. En effet, les *Alphaherpevirinae* sont parmi les virus mammifères les plus anciens, qui ont co-évolué avec leurs hôtes naturels depuis plusieurs millions d'année [109]. Ce niveau d'adaptation a été nécessaire pour l'établissement d'une infection persistant tout au long de la vie de l'hôte, mais également pour établir des relations étroites entre le virus et son hôte au niveau moléculaire. Néanmoins, les *Alphaherpevirinae* peuvent être utilisés pour infecter expérimentalement un certain nombre d'espèces différentes de leur hôte naturel.

Les animaux les plus fréquemment utilisés pour étudier l'infection herpétique *in vivo* sont la souris et le lapin. L'étude de la latence / réactivation est plus aisée chez la souris car dans ce modèle, le virus ne se réactive pas spontanément, contrairement à ce qui est observé chez le lapin (multiples réactivations subintrantes). Chez la souris, la réactivation de HSV-1 peut en revanche être induite, notamment suite à un stress thermique [110], un traitement par butyrate de sodium (qui inhibe l'histone dé-acétylase [111]) ou encore par la mise en culture des organes infectés (explants) de façon latente (réactivations *ex vivo*) [112 113].

Le modèle murin le plus utilisé dans la littérature repose sur une primo-infection par scarification cornéenne puis adsorption d'une suspension virale sur la cornée lésée. Dans ce modèle,





certaines marqueurs de réplication virale, tels que des transcrits viraux codant des protéines IE, E et L de la phase lytique, peuvent persister bien au-delà de la phase de primo-infection. Ils sont régulièrement retrouvés lors de la phase de latence précoce (28 jours post inoculation, J28 p.i.) et même à des temps de latence plus tardifs (J100 p.i.) [114]. Ce modèle ne paraît donc pas le plus adéquat pour étudier les phénomènes de latence / réactivation, eu égard à la présence persistante et paradoxale de ces marqueurs de réplication virale à des temps où ils devraient avoir disparus. En outre, la primo-infection par scarification cornéenne est très éloignée des conditions de l'infection humaine, puisque chez l'homme, la primo-infection passe presque exclusivement par une inoculation orale (cf 1.1) [1].

### 2.5.3 Le modèle murin oro-oculaire

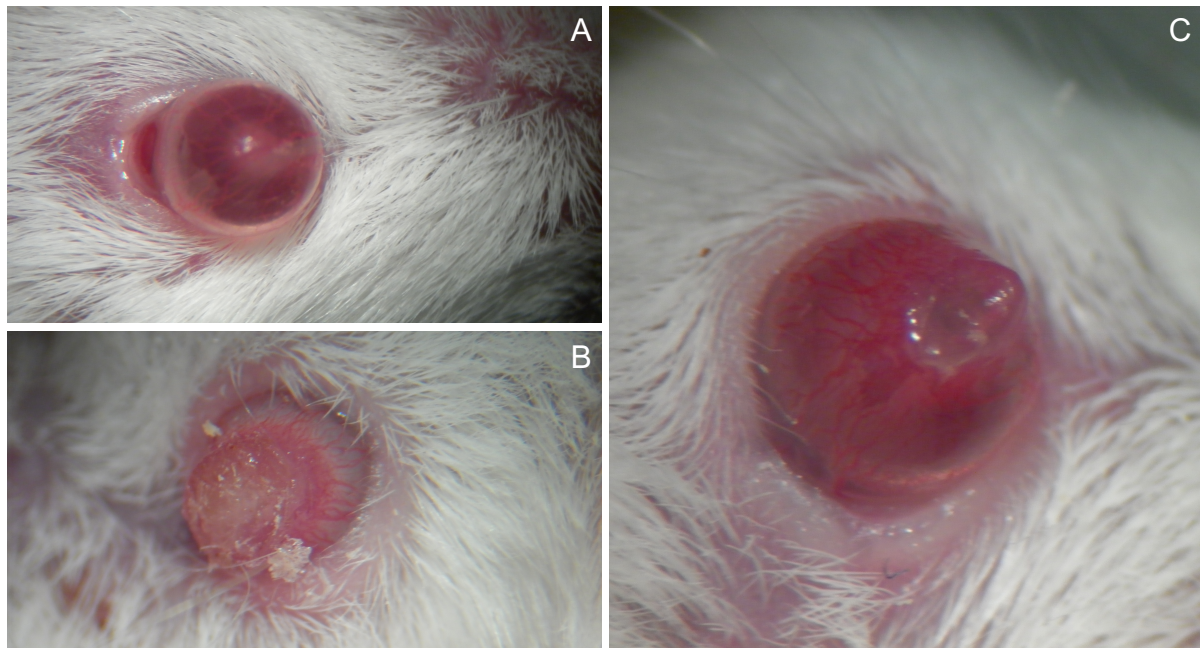
Notre équipe d'accueil a développé un modèle murin d'infection herpétique oro-oculaire (OO), qui présente l'avantage unique de reproduire en grande partie l'histoire naturelle de l'infection chez l'homme : primo-infection par voie orale (inoculation labiale) puis latence du virus dans les deux TG, comme chez l'homme. De plus, les atteintes oculaires (notamment les réactivations) ne sont observées que d'un côté (celui de l'inoculation), alors même que du génome viral latent est bien retrouvé dans les deux TG de façon symétrique en phase d'infection latente (sans expression protéique), associés à des LAT [60].

#### Pathogénèse virale et propagation du virus dans le modèle murin oro-oculaire

Le modèle murin d'infection herpétique OO a été décrit initialement avec la souche sauvage SC16 de HSV-1, isolée à partir d'un patient par Hill et al. en 1975 [115]. Plusieurs des résultats acquis depuis l'ont été avec des souches génétiquement modifiées à partir de cet arrière-fond génétique. Après inoculation dans la lèvre supérieure gauche, le virus se propage sur les fibres nerveuses sensibles, pour atteindre le TG gauche (ipsilatéral au côté d'inoculation) à J4 p.i. Les neurones du TG sont responsables de l'innervation sensitive de la face et correspondent au site principal de la latence de HSV-1, c'est pourquoi nos études sont centrées principalement sur cet organe nerveux. Le virus peut ensuite se propager depuis le TG gauche vers le système nerveux central (SNC), où HSV-1 peut être détecté par immunomarquage à partir de J6 p.i. [116]. A cette date, le noyau du tractus solitaire, l'area postrema, le locus coeruleus et l'hypothalamus, tous connectés au système trigéminal, sont



infectés des deux côtés. Suite à l'infection bilatérale de ces structures médianes, le virus se propagerait vers le TG droit (controlatéral au site d'infection) où il est retrouvé à J6 p.i. Par ailleurs, depuis les TG, le virus migre de façon antérograde vers le ganglion ciliaire puis l'œil. Dans notre modèle, les animaux présentent des signes généraux d'infection à partir de J4 p.i., puis des signes d'infection oculaire (mydriase, opacités ulcères et néovascularisation cornéenne, blépharite) entre J6 et J10 p.i., mais uniquement du côté de l'inoculation (**Figure 9**).



**Figure 9** : Signes cliniques oculaires dans le modèle oro-oculaire. A) Néovascularisation cornéenne. B) Ulcère cornéen avec opacification, croûtes et blépharite. C) Ulcère avec néovascularisation.

Le virus pourrait aussi directement atteindre théoriquement le TG droit via la propagation le long des fibres sensibles innervant la bouche, suite à une multiplication virale locale au site d'inoculation niveau (lèvre supérieure gauche) avec passage de virus dans la salive puis dans des zones buccales connectées au TG droit.

Cependant, même si cette voie de diffusion est possible, elle n'est certainement pas majoritaire dans la mesure où l'injection du virus dans la lèvre gauche est faite en profondeur (sous cutanéomuqueuse), limitant ainsi la propagation virale dans la sphère buccale.

Par ailleurs, les sites d'infection herpétique dans les jours qui suivent l'inoculation sont difficilement compatibles avec une diffusion par voie hématogène car tous les essais d'inoculation



intraveineuse de virus chez la souris et le lapin ont conduit à des atteintes principalement hépatiques et pulmonaires, mais une diffusion très limitée (voire absente) dans le système nerveux central [117-119]. De ce fait, la propagation du virus dans les TG et dans le SNC dans notre modèle ne résulte probablement pas de la diffusion hématogène du virus, et les zones cérébrales atteintes sont toutes connectées aux voies trigémინées ou sympathiques connectées à la bouche, sans atteinte primitive du cerveau, comme cela est observé dans les exceptionnelles encéphalites virales.

Le virus se propage de façon simultanée, le long des voies sympathiques jusqu'au ganglion cervical supérieur (SCG) gauche où il arrive dès J2 p.i. (**Figure 10**). Il se propage ensuite jusqu'à la colonne intermédiolatérale (IML) dans la moelle épinière gauche (entre J6 et J8 p.i), puis droite entre J8 et J10. Depuis l'IML, le virus gagne le SCG droit et infecte différentes structures du SNC de manière bilatérale, les noyaux du tractus solitaires les noyaux paraventriculaires, supra chiasmatiques et amygdaloïdes de l'hypothalamus et la *zona incerta*. Il est à noter que plusieurs de ces structures sont aussi liées à la rétine, de façon directe, ce qui pourrait expliquer la survenue d'atteintes rétiniennes en clinique humaine [20].

La propagation du virus depuis la lèvre est expliquée par la capacité du virus à se propager selon le réseau transynaptique (réseau de neurones connectés entre eux par des synapses). Mais il faut également prendre en compte la propagation entre deux neurones adjacents situés dans une même structure anatomique mais sans connexion synaptique (transfert local), en particulier par le biais d'une infection des cellules gliales [20].





importante du côté inoculé (côté gauche), de même que le nombre de neurones exprimant ces LAT [60 61]. Or, l'expression de ces derniers est étroitement associée à la possibilité ultérieure de réactivation virale. A l'inverse, une infection herpétique sans expression des LAT est considérée comme peu réactivable [79].

## **2.6 Rôle des corps nucléaires PML dans l'alternance latence / réactivation**

Les corps nucléaires PML ou PML-NB (parfois retrouvés sous le terme ND10) ont un rôle essentiel dans la régulation de l'alternance latence / réactivation. Ils font l'objet d'une attention très particulière dans la communauté scientifique.

Comme expliqué plus haut, dès son entrée dans le noyau des cellules infectées, l'ADN viral se circularise et se localise au niveau des PML-NB [54], habituellement associés à une répression des séquences géniques situées dans leur environnement [55]. Les PML-NB sont constitués de la protéine PML, mais également de la protéine sp100, des protéines Daxx et ATRX (des protéines chaperonnes impliquées dans l'assemblage des histones 3.3 sur la chromatine) [121].

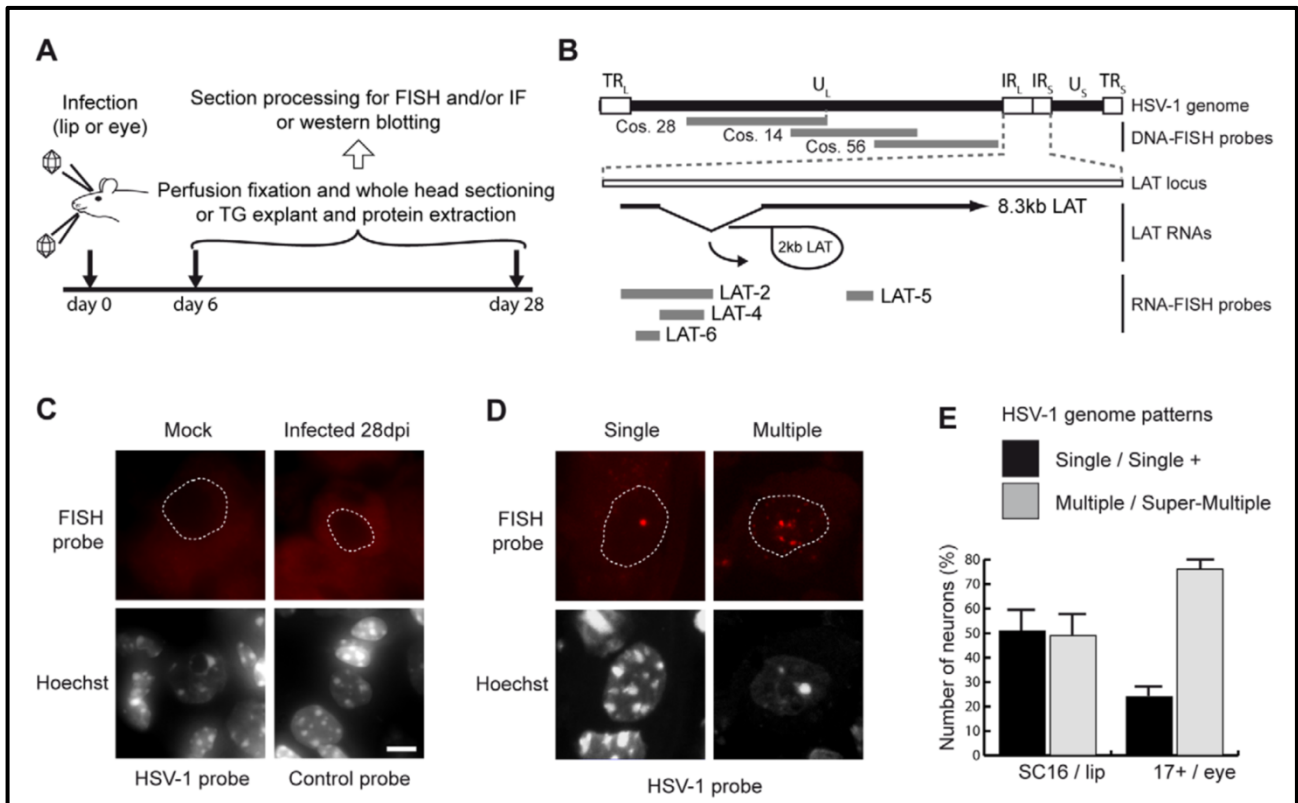
Au cours de la phase de réplication et en début de réactivation, la protéine ICP0 de HSV-1 induit la transcription du génome viral en activant la dégradation PML-NB (et notamment certains de leurs composants tels que la protéines sp100). A l'inverse, le nombre de PML-NB augmente sous l'effet de l'IFN de type I [54].

L'interaction des PML-NB avec le génome d'HSV-1, les interactions entre ces structures nucléaires, les protéines virales, les IFN ont été décrites beaucoup plus en détail [122-124]. Les mécanismes biologiques cellulaires intimes de ces interactions a en effet constitué la thématique de recherche de l'équipe de Patrick Lomonte (CNRS, Lyon), depuis plusieurs années. Nous avons eu la chance de collaborer à ces travaux, qui se sont notamment appuyés sur le modèle OO développé dans notre équipe. Nous verrons ci-dessous rapidement les résultats des trois dernières études publiées sur le sujet.



Première étude : le positionnement du génome d'HSV-1 et son association avec les PML-NB régule la transcription de LAT en phase de latence

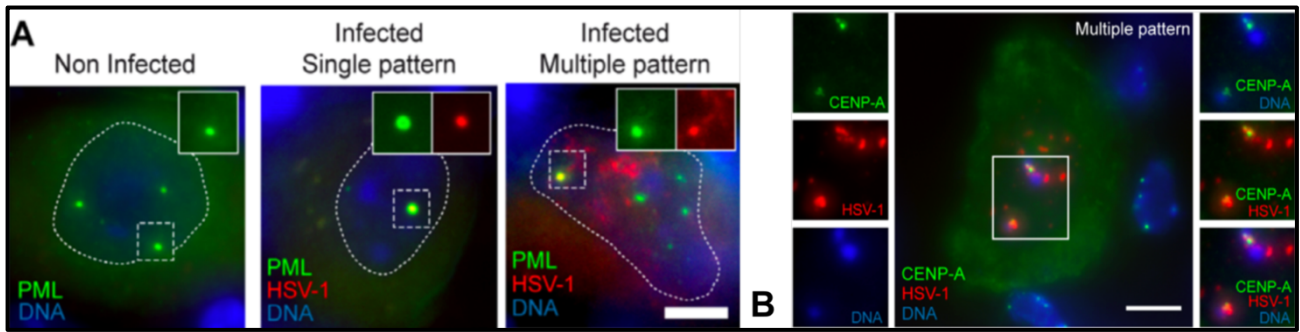
En combinant des approches d'hybridation *in situ* avec des sondes d'ARN de LAT fluorescents et de microscopie en haute résolution, sur 2 modèles murins (le modèle OO, ainsi qu'un modèle d'infection par scarification cornéenne), Catez *et al.* ont d'abord décrit deux types de distribution nucléaire des génomes viraux **en latence** (à J28 p.i.) : présence d'un génome unique (modèle *single latent*) ou bien de génomes multiples (*multiple latent*) (**Figure 11**) [122].



**Figure 11**, d'après [122] : Détection *in situ* du génome de HSV-1 sur des sections de TG de souris infectées à la phase de latence. A) Modèles d'infection latente, oro-oculaire ou par scarification cornéenne. B) Représentation schématique du génome d'HSV-1 et du locus de LAT et des sondes d'hybridation *in situ*. C) Contrôles d'hybridation *in situ* sur des souris non infectées. Les pointillés indiquent la position du noyau. D) Les modèles de génome viraux unique (*single latent*) et multiple (*multiple latent*) au sein des noyaux. E) proportion des 2 modèles en fonction des modèles murins d'infection utilisés.

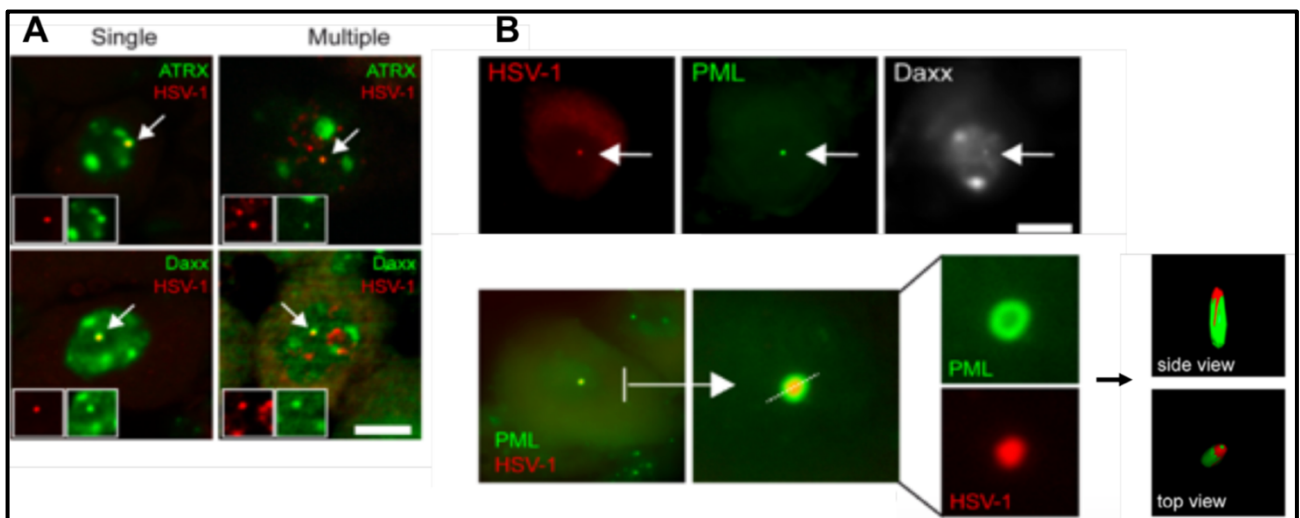
L'imagerie cellulaire en microscopie à fluorescence confirmait l'association des génomes viraux aux PML-NB (**Figure 12**).





**Figure 12**, d'après [122] : Coupes sur TG de souris à J28 p.i. de l'inoculation labiale. A) Co-localisation en immuno-FISH du génome d'HSV-1 et des protéines PML dans le noyau B) Co-localisation du génome d'HSV-1 et des centromères.

La reconstruction en 3D des images a permis de déterminer que dans la configuration *single latent*, les génomes viraux sont entourés par les protéines répressives PML, mais également Daxx et ATRX. Dans cette configuration, il n'y a pas (ou très peu) d'expression de LAT. En revanche, dans la configuration *multiple latent*, la distribution des génomes est plus hétérogène : les génomes viraux sont soit associés aux centromères ou aux PML-NB, soit non associés (**Figure 13**).



**Figure 13**, d'après [122] : A) Coupes de TG de souris infectées à la phase latente colorée par immuno-DNA-FISH avec de anticorps anti-ATRX, anti-Daxx et une sonde d'ADN d'HSV-1. Le génome d'HSV-1 est associé aux composants majeurs des PML-NB. B) Analyse en microscopie confocale d'un PML-NB contenant le génome de HSV-1 montrant que l'AND est à l'intérieur du PML-NB (Mesure de la fluorescence en 2D et reconstruction en 3D).

Pendant la phase d'établissement de la latence (entre J6 et J28 p.i.), une augmentation du nombre de PML est observée dans les TG de souris infectées. L'expression des LAT est augmentée dans les noyaux avec génomes multiples, ce qui confortait d'une part l'hétérogénéité de cette



expression, et sa relation avec le nombre de copie de génome viral. Enfin, à l'aide de souris KO pour PML, Catez *et al.* ont confirmé le rôle des PML et des PML-NBs dans le développement des 2 types de distribution des génomes nucléaires et leur rôle sur l'expression de LAT.

Cette étude montrait donc que des domaines nucléaires impliquant les PML-NBs et les centromères sont impliqués dans le contrôle de la latence, et jouent un rôle clef dans les interactions hôte/virus.

- Seconde étude : L'établissement de la latence est déterminé par les interactions du génome avec l'environnement nucléaire

Dans ce travail, Maroui et al. se sont intéressés plus particulièrement à **la phase aiguë**, et donc aux phénomènes liés à **l'établissement de la latence** [124]. Avec des outils similaires, et en utilisant le modèle OO, ils ont montré qu'à la phase aiguë, les génomes viraux ont également 2 types de distribution nucléaire : des compartiments de réplication uniques ou bien des localisations multiples et disséminées dans le nucléoplasme (« *multiple acute* »), similaires à ceux retrouvés en phase d'infection latente. Dans le type *multiple acute*, les génomes viraux sont constamment associés à la protéine PML dans des PML-NB contenant de l'ADN viral (nommées vDCP-NB pour *viral DNA containing PML-NB*). Afin de déterminer les facteurs viraux et cellulaires favorisant la distribution du génome associé à la latence, ils ont utilisé des souris sauvages ou KO pour le récepteur de l'IFN de type I, et un virus sauvage ou délété pour ICP4 (une protéine IE considérée comme un transactivateur viral majeur de HSV-1). Ils ont montré que l'incapacité du virus à initier un cycle lytique, combiné à son incapacité à synthétiser ICP0 étaient les 2 facteurs viraux essentiels à la formation des vDCP-NB. De plus, la formation des localisations multiples (*multiple acute*) est favorisée par la voie de l'IFN de type I. Enfin, l'analyse de TG humains infectés de façon latente a retrouvé une organisation des génomes viraux similaire à celle observée chez la souris, et notamment de la formation de vDCP-NB. Cette étude confortait le rôle majeur des PML-NB dans l'établissement et le contrôle de la latence chez l'homme.





- Troisième étude : Les PML-NB induisent une chromatinisation et donc la latence du génome d'HSV-1 via une interaction avec l'histone 3.3 et ses protéines chaperonnes

- Dans ce travail, Cohen et al. sont allés encore plus en profondeur dans la mécanistique de cette régulation épigénétique et du rôle des PML-NB [123]. Ils ont utilisé pour cela un modèle *in vitro* d'infection de fibroblastes dans lesquels HSV-1 ne peut se répliquer. Ils ont montré que les vDCP-NB contiennent les histones H3.3 associés à 2 complexes de protéines chaperonnes de ces histones (le complexe DAXX/ATRX et le complexe HIRA). Ils ont ensuite vérifié qu'HIRA était également associé avec les vDCP-NB *in vivo*, en l'occurrence dans les neurones des TG de souris infectées à la phase latente. De plus, les vDCP-NB associés aux génomes latents étaient chromatinisés exclusivement avec un H3.3 triméthylé sur K9, indiquant une interaction des chaperonnes de H3.3 avec de multiples loci viraux et un silençage transcriptionnel de HSV-1. Seule une inactivation simultanée des 2 complexes de chaperonne de l'histone 3.3 (le complexe DAXX/ATRX et le complexe HIRA) avait un impact sur la fixation d'H3.3 sur le génome viral. En revanche, la déplétion de PML (étude sur TG infectés de souris PML<sup>-/-</sup>) impactait directement la chromatinisation du génome viral avec H3.3. Les auteurs confirmaient par ailleurs que les génomes viraux contenus dans les vDCP-NB ne sont pas définitivement réprimés dans la mesure où la déstabilisation des vDCP-NB par ICP0 permet la reprise d'un cycle répliatif. Cette étude a donc démontré l'existence d'une régulation spécifique de la chromatinisation du génome viral dans les vDCP-NB, dépendante de H3.3, et impliquant ces 2 complexes (DAXX/ATRX et HIRA). Le rôle des PML-NB dans la régulation de l'alternance latence-réactivation passe donc par une chromatinisation du génome d'HSV-1 impliquant l'histone 3.3 et ses chaperonnes.



## 3 La réponse immunitaire anti-HSV-1

### 3.1 Réponse immune innée anti-HSV-1

Comme vu en 1.1 et 1.2, la grande majorité des primo-infections par HSV-1 est asymptomatique. Cette constatation clinique suggère que les infections par HSV-1 peuvent être rapidement et efficacement reconnues et prises en charges par la réponse innée, et ce bien avant qu'une réponse spécifique soit établie [125].

#### 3.1.1 Réponse interféron

La réponse IFN joue un rôle primordial dans l'immunité anti-HSV-1. Bien que les IFN de type I ( $\alpha$  et  $\beta$ ) soient les principaux effecteurs, les IFN de type II ( $\gamma$ ) et de type III ( $\lambda$ ) ont également leur importance.

Le rôle essentiel de la réponse IFN est d'ailleurs corroboré par l'identification de défauts dans la voie de signalisation de l'IFN de type I dans des familles de patients souffrant d'infections sévères et/ou particulièrement fréquentes à HSV-1, notamment d'encéphalites herpétiques [126]. Cette voie de signalisation est activée par la reconnaissance de PAMP (*Pathogen Associated Molecular Patterns*) par des détecteurs ou « senseurs » regroupés sous le terme de PRR (*Pathogen Recognition Receptors*).

#### Senseurs membranaires d'HSV-1

Plusieurs types de PRR peuvent détecter l'infection à HSV-1 (**Figure 15**) [127 128]. Les TLR sont des senseurs membranaires reconnaissant des acides nucléiques viraux ou des protéines virales.

Les **TLR2**, présents à la surface des cellules, reconnaîtraient certaines glycoprotéines d'enveloppe d'HSV-1 (non identifiées). Ce mécanisme serait mis en jeu dans les cellules microgliales du système nerveux central (cerveau et TG notamment) [128 129].

Les **TLR3** sont présents dans les endosomes, et reconnaissent des ARN double brins qui correspondent, dans le cas d'HSV-1, à des ARNm complémentaires transcrits à partir de séquences codantes orientées dans des directions opposées, ou des structures doubles brins formées à partir d'ARN simple brins [128]. Leur implication est essentielle dans le SNC, des mutations de TLR3 ayant



été mises en évidence dans des familles de patients sujets aux encéphalites herpétiques [11].

Les **TLR9** sont présents dans les endosomes, et en particulier dans les cellules dendritiques plasmactyoïdes, et notamment dans le TG. Ils reconnaissent l'ADN double brin d'HSV-1 [129].

### Senseurs cytosoliques

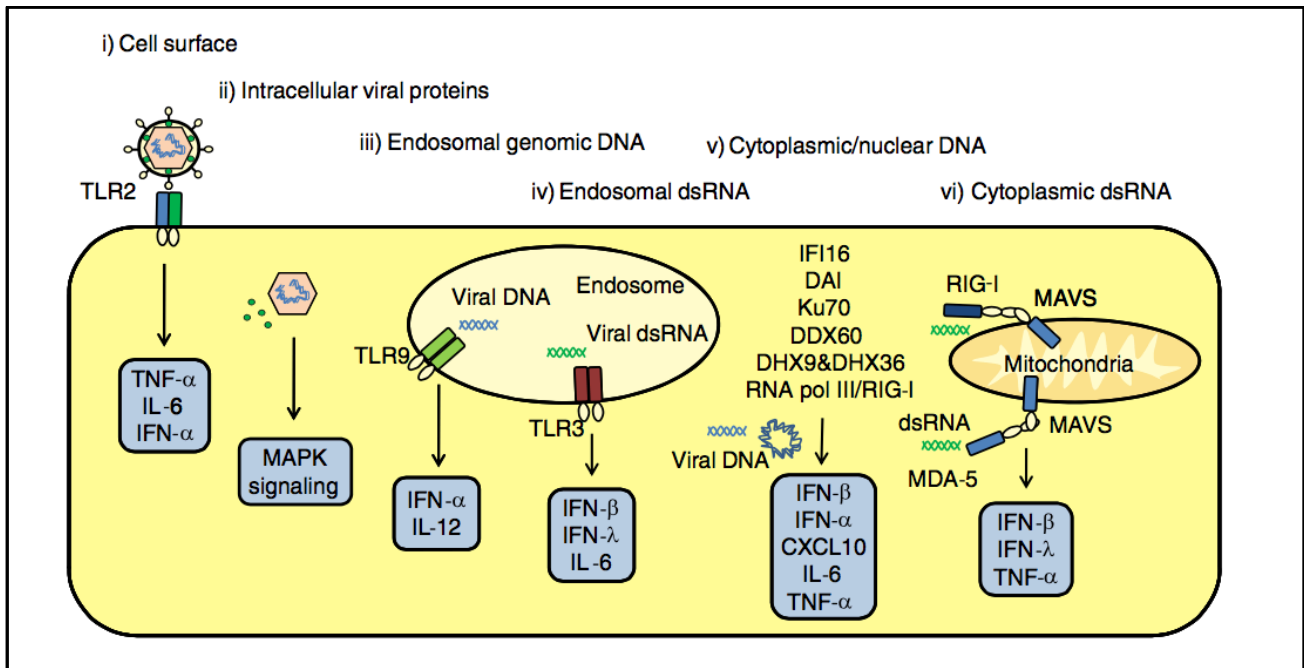
Certains détectent l'ARN viral, c'est le cas de RIG-I (*Retinoic acid- Inducible Gene I*) ou MDA-5 (*Melanoma Differentiation-Associated protein* [128]. D'autres détectent l'ADN viral, tels que DAI (*DNA-dependent Activator of IFN-regulatory factors*) et IFI16 (*Interferon gamma inducible protein 16*), mais également - Ku70, l'ARN polymérase de type III, les protéines DDX60 / DHX36 / DHX9 (*DEAH box proteins 9 / 36*) [128], et le système cGAS/STING (*cGMP-AMP synthase (cGAS)-stimulator of interferon genes (STING)*) récemment impliqué dans la détection d'HSV-1 par la microglie cérébrale [130].

### Senseurs nucléaires

Les structures PML-NB peuvent être considérés comme des senseurs nucléaires. Les travaux menés par Alandijani *et al.* à l'aide de virus mutants ont montré qu'à faible multiplicité d'infection (MOI), et en l'absence d'ICP0 (inhibiteur des PML-NBs), les PML-NBs trappent l'ADN viral, bloquent la réplication dès leur entrée dans le noyau, et déclenchent les ISGs, indépendamment des senseurs cytoplasmiques tels qu'IFI16, démontrant que l'entrée du virus dans le noyau est suffisante pour induire une réponse innée robuste. A plus forte MOI, les complexes ADN viral / PML-NB et ADN viral / IFI16 s'associent à ICP4 et induisent des gènes inductibles par l'IFN (ISG pour *IFN inducible genes*), mais dépendent de l'activité de l'ADN polymérase virale. Ces données indiquent donc un rôle double des PML qui dépendent de l'entrée dans le noyau et de la réplication virale [131].

Suite à l'activation de ces PRR, une cascade de signalisation est enclenchée, aboutissant à la production d'INF de type I, mais également de type III, tel que l'IFN  $\lambda$ , de chimiokines (CXCL10) et de cytokines inflammatoires telles qu'IL6, IL12 et TNF- $\alpha$  (**Figure 14**) [128].





**Figure 14** : Immunité anti-HSV-1 : du sensing aux cytokines, d'après [128].

Les **IFN de type I** sont relargués dans le milieu extracellulaire et se lient à leurs récepteurs composés de deux sous-unités, l'IFNAR1 et IFNAR2 (*Interferon-Alpha/Beta Receptors*). Cette liaison induit l'initiation de la voie JAK/STAT, et conduit à l'expression de multiples ISGs établissant ainsi un état réfractaire à l'infection virale. Les protéines codées par ces ISGs ont de nombreuses fonctions, incluant l'inhibition de l'expression de protéines virales, l'apoptose et le recrutement de cellules du système immunitaire au site d'infection.

L'activation du récepteur de l'**IFN de type III**, composé des sous-unités IL-10R2 et IFNLR1, qui active aussi la voie JAK/STAT et présente donc des conséquences biologiques similaires à celles des IFN de type I. Ainsi, le traitement des astrocytes et neurones humains par l'IFN-λ avant infection par HSV-1 inhibe la réplication du virus [132]. Le blocage du récepteur de l'IFN-α/β par un anticorps spécifique dans ces cellules compromet l'action de l'IFN-λ sur l'inhibition de HSV-1. De ce fait, il semblerait que l'IFN-λ induise une réponse antivirale dans les cellules neuronales via l'induction de l'IFN de type I.

L'**IFN-γ (type II)** est produit par les cellules *Natural Killer* (NK) (réponse innée) et les lymphocytes T (réponse adaptative). Il agit également dans le contrôle de l'infection herpétique. Les souris KO pour l'IFN-γ ou pour son récepteur présentent une capacité réduite à contrôler l'infection



par HSV-1. Elles présentent une plus forte mortalité, une infection aiguë prolongée et une plus grande incidence de réactivations virales [133]. L'IFN- $\gamma$  peut inhiber directement la réplication du virus, mais des études *in vitro* montrent que cette inhibition est relativement faible [134]. Pour inhiber efficacement la réplication d'HSV-1, l'IFN- $\gamma$  doit agir en synergie avec les IFN de type I ( $\alpha$  et  $\beta$ ). A titre d'exemple, le traitement de cellules épithéliales avec de l'IFN- $\beta$  ou - $\gamma$  inhibe la réplication de HSV-1 d'environ 20 fois alors que le traitement combiné avec ces deux types d'IFN l'inhibe plus de 1000 fois [134]. De plus, le pré-traitement des souris avec les deux types d'IFN avant l'infection par HSV-1 réduit la réplication virale à des niveaux quasiment non détectables et protège de la pathogénie induite par le virus. Lors d'une infection herpétique sur un modèle murin utilisant des souris C57/BL6, la production d'IFN- $\gamma$  dépend des TLR 2 et 9 [129]. Réciproquement, l'IFN- $\gamma$  stimule l'expression des TLR 3 et donc l'activité antivirale dans les kératinocytes [135].

La protéine PML est considérée comme une ISG. Son expression est de ce fait augmentée par l'IFN [136]. Nous avons abordé en **2.3** et en **2.6** le rôle de cette protéine et des PML-NB sur la répression des gènes viraux [137]. Cependant, lors de l'infection à HSV-1, les PML-NB se désagrègent, et la protéine PML est dégradée. Nous aborderons ce mécanisme de résistance du virus face à la réponse immune innée en **3.1.4**.

### **3.1.2 Rôle des cellules *Natural Killer* dans l'immunité innée anti-HSV-1**

#### **3.1.2.1 Rappels sur les cellules *Natural Killer* (NK)**

##### Généralités

Les cellules NK sont de grands lymphocytes granuleux, avec un cytoplasme riche en granules lytiques, ayant une demi vie courte, de l'ordre de 2 semaines [138].

Elles sont caractérisées chez l'homme par l'expression des molécules CD56, Fc $\gamma$ RIIIA/CD16 (CD16) et NKp46, et par l'absence d'expression de CD3, ce qui les distingue des LT. Chez la souris, les NK expriment CD335 (équivalent de Kp46), mais peuvent également être définies par le panel CD45<sup>+</sup>/Ly6G<sup>-</sup>/CD11c<sup>-</sup>/CD11b<sub>low</sub> [139] (**Cf. tableaux 1 et 2**). Si les NK sont le plus souvent associées à l'immunité innée, elles peuvent toutefois occuper une position clé à l'interface entre la réponse innée et la réponse adaptative. Les NK sont capables de reconnaître des cellules infectées par des virus sans exposition préalable aux antigènes viraux [140].



### Activation des NK

Dans des conditions normales, les NK expriment des récepteurs inhibiteurs, tels que le récepteur KIR-L (*Killer Ig-like receptors*), ILT-2 et CD94/NKG2a qui reconnaissent normalement les molécules du CMH-I. Les NK deviennent fonctionnels quand les stimuli activateurs dépassent l'inhibition induite par le CMH-I. Les stimuli activent les récepteurs KIR-S, des récepteurs proches des KIR-L, mais de fonction opposée [138]. Une fois activées, les NK vont devenir effectrices par différents mécanismes que nous verrons ci-dessous.

### Cytotoxicité directe des cellules NK

C'est la fonction des NK la mieux connue. Elle s'exerce par différents mécanismes, globalement similaires à ceux employés par les LTCD8<sup>+</sup>. Suite à la reconnaissance de la cellule cible, la cellule NK dégranule : elle libère à la synapse immunitaire le contenu de ses granules cytoplasmiques, en particulier la perforine qui forme des pores dans la membrane de la cellule cible. D'autres mécanismes cytotoxiques conduisant à la mort de la cellule cible par apoptose sont possibles : interactions Fas (sur la cible) vs Fas ligand (sur la cellule NK), interactions TRAIL-TRAIL récepteur (*TNF apoptosis inducing ligand*), libération de Granzyme B, sécrétion de TNF- $\alpha$ .

### Production de cytokines

Les cellules NK produisent en particulier de l'IFN- $\gamma$ , mais aussi du TNF- $\alpha$ , de l'IL-10, du GM-CSF (*Granulocyte-Macrophage-Colony Stimulating Factor*) et les chémokines : CCL3/MIP-1 $\alpha$  (CCL pour *C-C motif Ligand* et MIP pour *Macrophage Inflammatory Protein*), CCL4/MIP-1 $\beta$  et CCL5/RANTES (RANTES pour *Regulated on Activation, Normal T cell Expressed and Secreted*) [141] (**voir Chapitre II, Tableau 5**). Ces chémokines participent : i) à la régulation de la réponse inflammatoire, par exemple par le recrutement et l'activation de macrophages et de cellules dendritiques, ii) au contrôle direct de la réplication virale par la production d'IFN- $\gamma$ , iii) à l'orientation de la réponse adaptative.

### Cytotoxicité à médiation cellulaire dépendante des anticorps (ou ADCC)

Les NK sont les effecteurs majeurs de l'ADCC (via le récepteur Fc $\gamma$ RIIIA/CD16), qui constitue leur mécanisme d'action majeur pour reconnaître et lyser les cellules infectées par HSV-1.



### 3.1.2.2 Rôle des NK dans l'immunité innée anti-HSV-1

A l'instar de la réponse IFN, le rôle des NK dans la défense contre les infections à HSV-1 est essentiel [125], et leurs déficiences exposent à des infections récurrentes et gravissimes [142 143]. En effet, l'infection par HSV-1 diminue des signaux inhibiteurs et/ou augmente des signaux activateurs de NK (IFN de type I, notamment). Si l'ADCC est le mécanisme anti-HSV-1 majeur des NK (**cf. réponse immunitaire adaptative, 3.3**), le rôle des NK dans l'infection à HSV-1 pourrait commencer bien avant l'établissement d'une immunité spécifique. Le rôle des protéines virales ou cellulaires directement reconnues par les NK reste toutefois controversé. Nous verrons ci-dessous les différents mécanismes potentiellement impliqués dans des interactions directes entre HSV-1 et les NK [125] (**Figure 15**).

#### Signaux de contact

Les signaux de contact déclenchés par les interactions entre les récepteurs des NK et des ligands cellulaires sont indispensables à la cytotoxicité des NK. Certaines études suggèrent que des glycoprotéines de surface d'HSV-1 (gB, gD, gH/gL) pourraient directement activer les NK. Toutefois, les résultats sont contradictoires selon les modèles expérimentaux, et restent donc à confirmer [125 144 145].

#### Complexe majeur d'histocompatibilité de type I (CMH-I)

La présentation par le CMH-I requiert l'action de la protéine TAP (*transporter associated with antigen processing*) qui transfère les antigènes cytoplasmiques vers le RE où ils sont chargés sur les molécules du CMH-I et exportés à la surface de la cellule. La protéine ICP47 d'HSV-1 (codée par le gène Us12) inhibe TAP et diminue l'expression de surface du CMH-I dans les cellules infectées, ce qui aurait pour conséquence d'activer les cellules NK [125]. Toutefois, ICP47 ne se lie que très peu à la protéine TAP murine et ne bloque pas la présentation par le CMH-I chez la souris [146], ce qui rend cette voie d'activation des NK difficile à tester *in vivo* de façon expérimentale.

#### Récepteur NKG2D

Il s'agit d'un récepteur des NK impliqué dans la reconnaissance et la lyse des cellules tumorales ou infectées par des virus. Les cellules NK de patients infectés par HSV-1 ont globalement des niveaux plus élevés de NKG2D (possiblement induits par les IFN de type I) ce qui pourrait les



sensibiliser, et annuler au passage l'effet de la diminution de NKG2D à la surface des cellules infectées par HSV-1 [125] (cf. **3.1.5.2 Mécanismes d'échappement aux NK**).

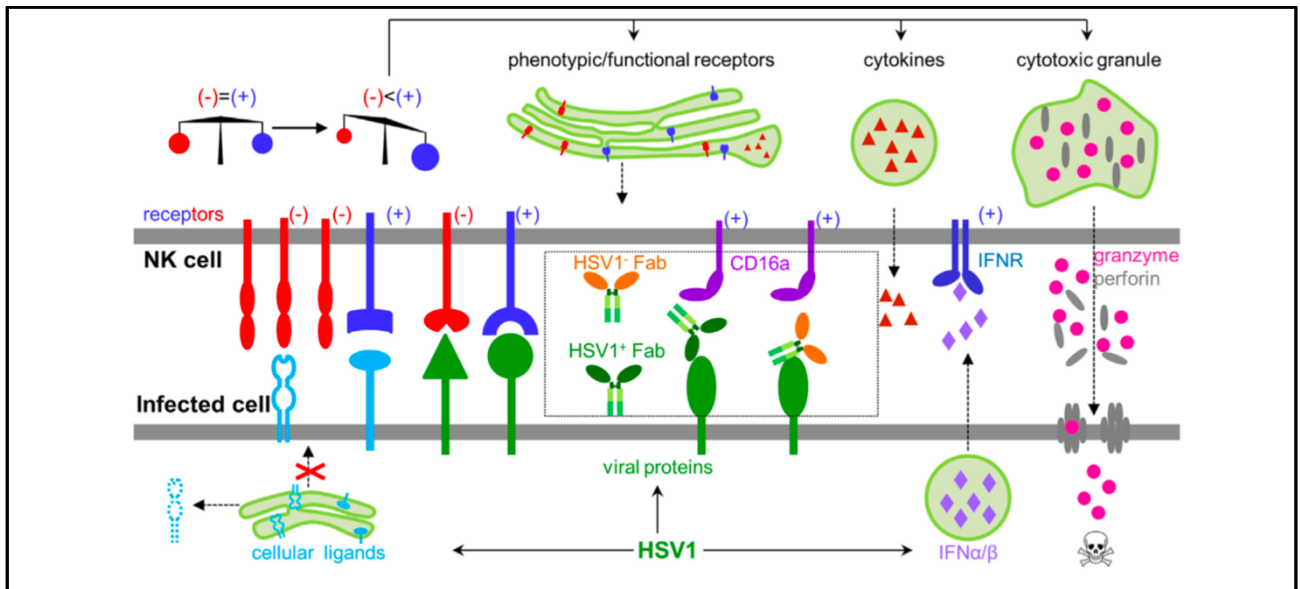
#### Glycoprotéines D et B

La **gD** joue un rôle essentiel dans l'entrée d'HSV-1 dans la cellule, via les récepteurs nectine et HVEM (cf. **2.3 HSV-1 : cycle réplcatif**). Cette dernière (qui appartient à la superfamille du TNF- $\alpha$ ) est exprimée de manière ubiquitaire par les cellules immunes humaines et murines et module les fonctions des LT. Elle semble par ailleurs jouer un rôle dans la synthèse d'IFN- $\alpha$ . Le récepteur HVEM pourrait donc être considéré comme un senseur en plus d'être un médiateur d'entrée. Toutefois, les résultats expérimentaux sur le rôle de la gD et d'HVEM dans l'activation des NK sont contradictoires. En effet, si l'expression de gD rend les cellules de gliomes infectées par HSV-1 résistantes au NK [147], le blocage de gD ne modifie pas les réponses des NK *in vitro* [145]. Les rôles de la gD et d'HVEM dans l'activation des NK restent donc à éclaircir [125].

La **gB** joue un rôle dans l'attachement et la fusion d'HSV-1 avec la membrane cellulaire [148]. Des recherches *in vitro* ont montré que le blocage ou l'absence d'expression de cette glycoprotéine diminuait la lyse par les NK de cellules endothéliales infectées par HSV-1 [149]. Les auteurs ont émis l'hypothèse d'une interaction entre TLR2 et gB sur les NK, mais n'ont pas pu démontrer l'expression de TLR2 par les NK, et ne pouvaient donc pas éliminer une activation secondaire des NK par la synthèse d'IFN secondaire à l'interaction TKLR2-gB dans les cellules infectées. D'autres études restent donc nécessaires pour confirmer le rôle de la gB dans la reconnaissance des cellules infectées par les NK [125].







**Figure 15**, d'après [125]. Principes généraux de la régulation de l'activité des NK durant l'infection par HSV-1. Les NK expriment à leur surface des récepteurs inhibiteurs et activateurs qui régulent leur activité. L'infection par HSV-1 peut orienter la réponse via la sécrétion d'IFN-I qui augmente l'expression de ligands activateurs et diminuent les ligands inhibiteurs, ou par la présence d'anticorps qui vont mener à une prédominance des signaux activateurs sur les signaux inhibiteurs. Les NK activés sécrètent des cytokines, expriment des protéines fonctionnelles, et relarguent de la perforine et du granzyme pour détruire les cellules infectées.



Marqueurs de surface	Fonction biologique	Populations marquées chez l'homme	Populations marquées chez la souris
<b>CD45</b>	Protéine phosphatase	Cellules hématopoïétiques	Cellules hématopoïétiques
<b>CD11b</b>	Intégrine	Macrophages / monocytes / granulocytes / NK	Macrophages / monocytes / granulocytes / NK
<b>CD11c</b>	Récepteur du complément	DC	DC
<b>CD56</b>	Protéine d'adhésion (superfamille des Ig)	NK	-
<b>CD335 (NKp46)</b>	Récepteur d'activation de la cytotoxicité des NK	-	NK
<b>CD16</b>	Récepteur de faible affinité du fragment Fc des Ig (impliqué dans l'ADCC)	NK / macrophages / monocytes, PNN	-
<b>Gr-1*</b>	Fonction non définie. Gr-1 est exprimé par Ly6G et Ly6C	-	Monocytes / macrophages / DC / PNN
<b>Ly6G</b>	Non définie	-	PNN / PNE / PNB
<b>Ly6C</b>	Non définie	-	Monocytes / macrophages
<b>CD3</b>	Co-récepteur activant les LTCD4 <sup>+</sup> et les LTCD8 <sup>+</sup>	LT	LT
<b>CD4</b>	Glycoprotéines de surface	LTCD4 <sup>+</sup> / monocytes / macrophages / DC / NK	LTCD4 <sup>+</sup> / monocytes / macrophages / DC / NK
<b>CD8</b>	Co-récepteur activant les LTCD8 <sup>+</sup>	LTCD8 <sup>+</sup>	LTCD8 <sup>+</sup>
<b>CD66b</b>	Adhésion et activation des PNN	PNN	-
<b>CD24</b>	Protéine d'adhésion (sialoglycoprotéine)	PNN / LB / LT / monocytes / CD	PNN / LB / LT / monocytes / CD
<b>CD64</b>	Glycoprotéine, récepteur aux Fc, impliquée dans l'ADCC	Monocytes, macrophages, DC, PNN activés	Monocytes, macrophages, DC

**Tableau 1** : Principaux marquages de surface des cellules inflammatoires hématopoïétiques.

Type cellulaire	Principaux marqueurs de surface chez l'homme	Principaux marqueurs de surface chez la souris
<b>LT</b>	CD3	CD3
<b>LTCD4<sup>+</sup></b>	CD3, CD4	CD3, CD4
<b>LTCD8<sup>+</sup></b>	CD3, CD4	CD3, CD4
<b>LB</b>	CD19, CD20	CD45R, CD17, CD22
<b>DC</b>	CD11c, CD123	CD11c, CD123
<b>NK</b>	CD56	CD335
<b>Macrophage/ monocyte</b>	CD14, CD33	CD11b/Mac-1, F4/80
<b>PNN</b>	CD66b	Gr-1/Ly6G
<b>PNE</b>	CD66b CD15, CD125, CRTH2	Siglec-F, CD193

**Tableau 2** : Principaux marquages de surface des cellules inflammatoires hématopoïétiques.



### 3.1.3 Rôle des neutrophiles dans l'immunité innée anti-HSV-1

#### 3.1.3.1 Rappels sur les polynucléaires neutrophiles (PNN)

##### Généralités

Les PNN sont des cellules myéloïdes dont le noyau est polylobé et le cytoplasme riche en granulations [150]. Chez l'homme, elles sont définies par la présence de CD66b et CD15 à leur surface et une granularité importante (*Side scatter* ou SCC élevé). Chez la souris, les PNN peuvent être définis en cytométrie en flux multiparamétrique par les marquages CD45<sup>+</sup>/Ly6G<sup>+</sup> [139] (**cf. tableaux 1 et 2**). Les PNN sont généralement négatifs pour CD11c (CD11c<sup>-</sup>) et positifs pour le CD11b (CD11b<sup>+</sup>).

##### Fonction phagocytaire

Le rôle des PNN est d'éliminer le plus rapidement tous les intrus exogènes à l'organisme, ce qui implique une réponse immédiate aux facteurs d'attraction (chémokines sécrétées par les cellules endothéliales, mastocytes et macrophages) et une migration rapide dans les tissus infectés (diapédèse). La reconnaissance des cibles et l'activation se font grâce à des PRR qui sont présents à la surface des cellules phagocytaires, dans les endosomes et dans le cytosol. Parallèlement à son activation, le PNN engage automatiquement un processus de mort programmée, qui va être retardé par de nombreux facteurs présents au cours du processus inflammatoire (G-CSF, GM-CSF, IFN- $\gamma$ , IL-8, IL-1 $\beta$ , IL-4, TNF- $\alpha$  à faibles concentrations...[150]).

Une fois activé, le PNN a un rôle de phagocytose : il émet des pseudopodes englobant la cellule cible avant de l'inclure dans des vacuoles cytoplasmiques où elle passe par diverses étapes de dégradation et de digestion. La fixation du PNN sur sa cible est facilitée par les opsonines (IgG1, IgG3 et dérivés du facteur C3 du complément). Ces dernières se fixent sur les récepteurs Fc $\gamma$  des PNN par leur fragment Fc. La destruction des agents pathogènes phagocytés a lieu grâce à des mécanismes enzymatiques indépendants de l'oxygène (impliquant notamment perforine, granzyme et myéloperoxydase [150 151]), ou bien la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS pour *reactive oxygen species*).



### Régulation du système immunitaire

Au-delà de leur fonction de phagocytose, les PNN jouent également un rôle de régulation de la réponse immune et du remodelage tissulaire. Les ROS produits dans le milieu extracellulaire modulent la signalisation intracellulaire et les fonctions des cellules présentes au site de l'inflammation comme la production de cytokines, les réponses prolifératives lymphocytaires et l'apoptose. L'IL-8, principale cytokine produite par les PNN, est responsable d'une augmentation de la migration des PNN au site inflammatoire. Certains PNN sont porteurs d'immunorécepteurs de type TCR dont l'activation permet d'augmenter leur survie et de stimuler la production d'IL-8 [150]. Les PNN contribuent aussi, par l'intermédiaire de la production de chimiokines telles que CCL3, CCL4, CCL5/RANTES, CCL20/MIP-3 $\alpha$ , à recruter et activer les cellules dendritiques (ou DC pour *dendritic cells*) et LT, permettant ainsi la mise en place de la réponse adaptative [150]. L'utilité de cette fonction du PNN vis-à-vis d'un antigène spécifique est sa rapidité de réponse, permettant d'attendre le relais par la réponse classique des LT aux antigènes.

En effet, les PNN sont les premières cellules infiltrant le foyer inflammatoire, et leur production de cytokines peut être déterminante à ce stade précoce de la réponse immunitaire innée. Après élimination de l'agent pathogène, la réponse inflammatoire s'autolimité, avec diminution du nombre des PNN, la suppression de leur activation, production de protéines anti-inflammatoires, apoptose et élimination par les macrophages.

#### **3.1.3.2 Rôle des PNN dans l'infection par HSV-1**

Le rôle des PNN dans l'immunité innée anti-HSV-1 a été assez peu étudié, dans des modèles et des pathologies très différents, avec des résultats controversés sur leur rôle antiviral, comme sur leurs effets sur les organes infectés.

#### Rôles bénéfiques

Dans une étude sur un modèle murin de rétinite herpétique par injection intraoculaire d'HSV-1, les souris déplétées en PNN avaient une diffusion intraoculaire et des lésions de rétinite beaucoup plus étendue que les souris contrôles, associées à une charge virale intraoculaire significativement plus élevée. Ces résultats suggèrent le rôle bénéfique des PNN pour limiter l'infection herpétique oculaire [152].



Dans une étude *in vitro*, Hayashi *et al.* montraient le rôle potentiel des PNN dans le contrôle initial de l'infection herpétique. Des PNN cultivés en présence de surnageants de cellules épithéliales cornéennes humaines (CECH) infectées par HSV-1 sécrétaient de l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et de la myéloperoxydase et permettait une diminution de la réplication virale dans les CECH [153].

Sur un modèle murin de kératite herpétique, mettant en jeu des souris immunodéficientes, déplétées en neutrophiles et plus ou moins riches en LTCD4<sup>+</sup>, l'infection cornéenne induisait un recrutement massif de neutrophiles qui accélèrent la clairance virale et contribuent directement ou indirectement à perpétuer une réaction inflammatoire médiée par les LTCD4<sup>+</sup> [154].

### Rôles délétères

L'exemple le plus frappant du rôle délétère des PNN dans l'infection par HSV-1 est celui qu'ils jouent l'encéphalite herpétique. En effet, les lésions cérébrales sont en grande partie liées à une réaction inflammatoire incontrôlée, avec une infiltration massive de PNN à la phase aiguë de l'infection [155]. Ramakrishna *et al.* ont montré dans un modèle murin que l'INF- $\gamma$  diminuait la sécrétion de G-CSF, avec pour conséquence une apoptose plus rapide des PNN, mais également l'augmentation de l'IL10 par les LT et une meilleure survie des souris [156]. Les auteurs plaçaient ainsi ces interactions antagonistes G-CSF / INF- $\gamma$  au centre de la régulation de la réponse inflammatoire dans l'encéphalite à HSV-1.

Dans une publication récente sur un modèle de kératite herpétique sur des souris dépourvues de mastocytes, infectées par scarification cornéenne, Royer *et al.* montraient que l'infiltration cornéenne par les PNN était très augmentée par la déplétion mastocytaire. Par ailleurs, l'infiltration cornéenne par les PNN contribuait à une augmentation de la réplication virale intracornéenne et augmentait la dissémination du virus au système nerveux (TG), en raison d'une réplication d'HSV-1 au sein des PNN. Les auteurs concluaient que dans ce modèle, les PNN potentialisaient l'infection et sa dissémination [157].

Enfin, une étude *in vitro* suggérait que la synthèse de GM-CSF par certains types cellulaires de la cornée, tels que les fibroblastes et les cellules épithéliales augmentaient la survie des PNN et modulaient leurs fonctions effectrices [28].



### 3.1.4 Rôle des éosinophiles dans l'immunité innée anti-HSV-1

#### 3.1.4.1 Rappels sur les polynucléaires éosinophiles (PNE)

Ces cellules n'ont jusqu'à présent pas été associées à l'immunité anti-HSV-1. Nos résultats expérimentaux nous ont incité à étudier les données déjà connues sur leurs rôles habituels dans le système immunitaire.

##### Généralités

Les PNE sont des cellules myéloïdes caractérisés par l'existence de volumineuses granulations intracytoplasmiques basiques/ cationiques, colorées par l'éosine. Les PNE sont très peu nombreux dans le sang, ils sont présents en revanche dans les tissus périphériques, en particulier la peau et les muqueuses. Chez l'homme, les PNE peuvent être définis par l'absence de CD66b et la présence de CD15, et éventuellement de CD125 (récepteur à l'IL5) et de CRTH2. Chez la souris, les PNE peuvent être définis en cytométrie en flux multiparamétrique (CMF) par les marquages CD45<sup>+</sup>/Ly6G<sup>-</sup>/CD11c<sup>+</sup>/CD64<sup>+</sup>/CD11b<sup>+</sup> [139] (cf. **tableaux 1 et 2**).

Les PNE jouent des rôles dans les réponses innées et adaptatives. Leurs granulations spécifiques contiennent : la protéine basique majeure (MBP), la protéine cationique de l'éosinophile (ECP), la neurotoxine dérivée de l'éosinophile et l'éosinopéroxydase (EPO). Sous l'action conjuguée de chimiokines et de facteurs chimio-attractants (notamment l'éotaxine-1 / CCL11, mais également l'IL5, les leucotriènes, l'histamine) et de molécules d'adhésion (notamment endothéliales) les PNE vont se domicilier dans les tissus.

Les PNE peuvent libérer le contenu de leurs granulations cytotoxiques pour détruire des cellules tumorales ou des parasites. A l'instar des PNN, les PNE ont la capacité de produire des ROS. Les polynucléaires éosinophiles sont essentiellement des cellules pro-inflammatoires. Les polynucléaires éosinophiles stockent ou synthétisent des cytokines (IL-1, IL-4, IL-6, TNF $\alpha$ ...), des chimiokines (éotaxine), des médiateurs lipidiques (leucotriènes, prostaglandines, PAF...), des protéines cationiques (MBP, ECP, EPO...) qui entretiennent et amplifient les réactions inflammatoires. Les PNE ont également des capacités de phagocytose. Ces effets pro-inflammatoires peuvent être protecteurs lorsqu'ils ont une action anti-infectieuse ou anti-tumorale ou participent au remodelage tissulaire. Ils peuvent être délétères s'ils sont mal contrôlés.



### Pathologies associées aux PNE

On observe une éosinophilie dans de nombreuses situations. Toutefois, les effets et la toxicité tissulaire des PNE sont liés aux composants des granules qui sont relargués dans les tissus périphériques. C'est donc l'hyperéosinophilie tissulaire et non sanguine, qui explique le retentissement viscéral des éosinophilies.

Les PNE sont impliqués dans la **maladie allergique**. Cette dernière est le plus souvent initiée par la génération de LTCD4 spécifiques d'allergènes, qui produisent des cytokines Th2 (IL-4, IL-5, IL-9, et IL-13) permettant la maturation, la prolifération, la survie et l'activation des basophiles et des mastocytes, mais aussi des PNE. Les PNE sont également impliqués dans l'immunité contre **les helminthes** [158].

#### **3.1.4.2 Rôle des PNE dans l'infection par HSV-1**

A notre connaissance, aucun rôle direct des PNE n'a pour l'instant été rapporté dans le contrôle de l'infection par HSV-1. Il est toutefois intéressant de rapporter 2 observations cliniques notables : i) les infections herpétiques oculaires sont plus fréquentes et souvent plus sévères chez les patients allergiques [159 160], ii) la surinfection par HSV-1 des lésions d'eczéma est particulièrement grave (syndrome de Kaposi-Juliusberg ou *eczema herpeticum*) [161]. Toutefois, la physiopathologie de ces associations n'est pas élucidée et le rôle des éosinophiles n'est que spéculatif.

Enfin, une étude sur 44 patients souffrants d'herpes labiaux (HSV-1) et génitaux (HSV-2) comparés à des contrôles, l'activité phagocytaires des éosinophiles était augmentée dans le groupe des patients [162].



### 3.1.5 Mécanismes d'échappement d'HSV-1 à la réponse immune innée

Ces mécanismes sont très nombreux, témoignant de la co-évolution de ce virus avec son hôte, et les recherches dans le domaine en révèlent régulièrement de nouveaux. En voici une liste d'exemples non exhaustive.

#### 3.1.5.1 Protéines virale diminuant la réponse interféron

##### ICP0

ICP0 joue un rôle majeur pour diminuer la réponse IFN. Elle agit en inhibant la translocation d'IRF3, ce qui conduit à sa dégradation, bloque la production d'IFN et inhibe l'induction des ISGs [163]. ICP0 est également impliquée dans la déstabilisation des PML-NB et dans la dégradation de deux de leurs composants principaux : les protéines PML et Sp100 via le protéasome [164 165]. Le génome viral libéré des PML-NB peut plus facilement engager un cycle lytique. A l'inverse, sur les souches virales délétées ou mutées sur ICP0, les PML-NB persistent et la réplication virale est diminuée, notamment à faible MOI [166].

##### ICP27

Les macrophages infectés par un virus délété d'ICP27 présentent une plus forte activation d'IRF3 et de NF- $\kappa$ B et produisent une plus grande quantité de cytokines en comparaison de ceux infectés par le virus sauvage [167]. De plus, ICP27 inhibe la phosphorylation et l'accumulation nucléaire de STAT1 lors de l'infection à HSV-1 [168]. De ce fait, cette protéine virale bloque la voie de signalisation induite par l'IFN et inhibe la réponse antivirale.

##### ICP 34.5

ICP 34.5 joue également un rôle important pour diminuer la réponse INF. Son extrémité N-terminal forme un complexe avec la protéine TBK-1, inhibant ainsi l'activation d'IRF3 et la synthèse des ISGs. Les souches d'HSV-1 délétées pour cette protéine sont d'ailleurs **dépourvues de neurovirulence** [169].

##### Autres protéines virales

La protéine de tégument **VP22** et la protéine **VHS** inhibent la production d'IFN- $\beta$  en interférant avec la voie cGAS/STING [170 171]. La protéine codée par **Us11** inhibe la production de 2'-5' oligoadénylates (OAS) sur des cellules humaines préalablement traitées par IFN- $\alpha$ . Le mécanisme





implique une interaction d'Us11 et des OAS via des complexes contenant des ARN double brin. La séquestration de ces ARN double brin, reconnus par certains senseurs (**cf. Réponse interféron 3.1.1**), en font un mécanisme d'évasion probable [169]. Enfin, la protéine codée par **Us3** pourrait également jouer un rôle protecteur contre les IFN. Us3 diminuerait la synthèse de TLR3 et d'IRF3, diminuant ainsi la réponse INF I. En outre, Us3 bloquerait également la synthèse des ISGs induit par l'IFN- $\gamma$  [169].

### 3.1.5.2 Mécanismes d'échappement aux NK

Chez l'homme, les récepteurs (activateurs) NKG2D peuvent se lier à des molécules apparentées au CMH-I tels que MICA, MICB (*MHC class I polypeptide-related sequence A and B*) ou encore ULBP (*UL16-binding proteins*). Les cellules infectées par HSV-1 diminuent leur expression de MICA et ULBP, ce qui aide potentiellement les cellules infectées à échapper aux NK [125].

Les complexes gE-gI présents à la surface des cellules infectées participent à la formation de « pontage » d'anticorps, dans lequel un anticorps spécifique d'HSV-1 se lie par son fragment Fab à un antigène et par sa région Fc à la gE. Ce pontage pourrait bloquer l'accès du récepteur Fc $\gamma$ RIIIA/CD16a des NK à la région Fc et induire l'endocytose d'antigènes viraux. Cette inhibition de l'ADCC peut être considéré comme un mécanisme d'évasion à l'immunité innée [125].

## 3.2 Présentation de l'antigène : la transition vers la réponse adaptative

### 3.2.1 Monocytes / Macrophages

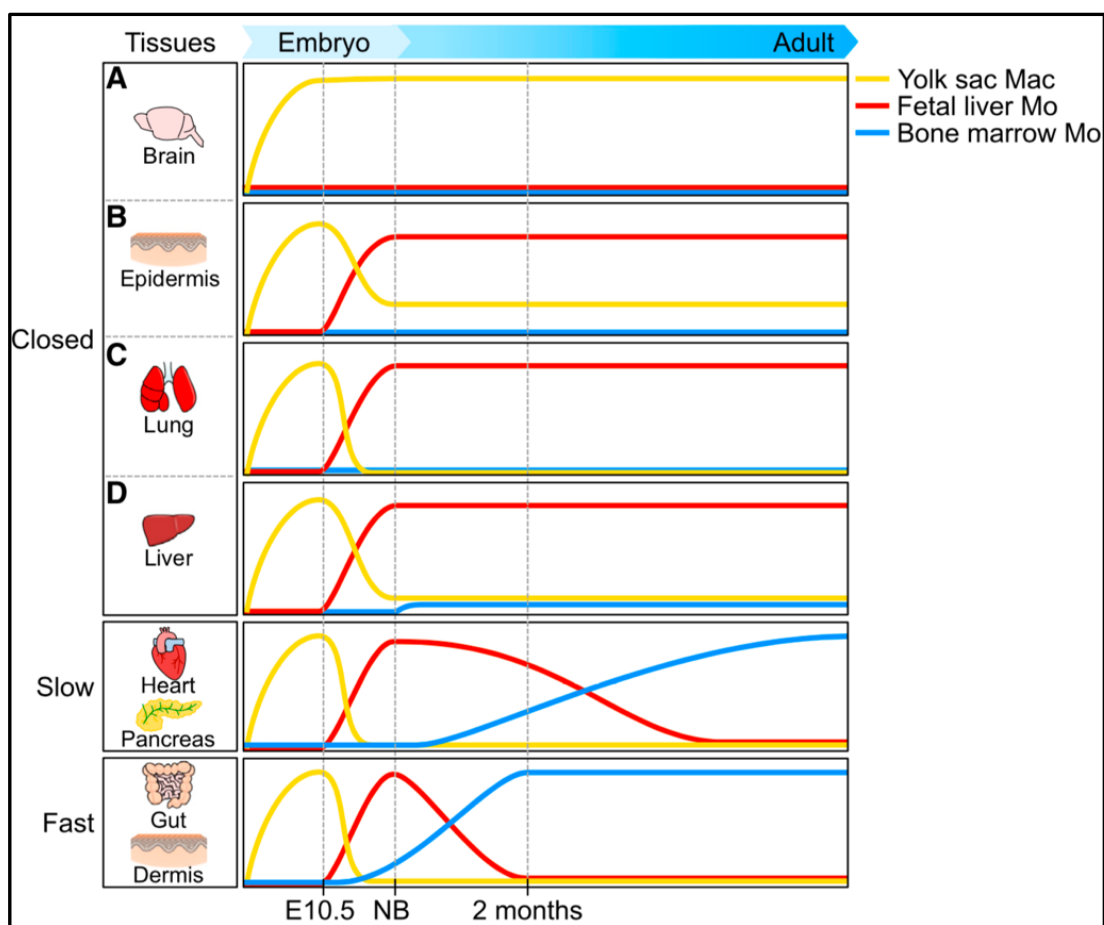
#### 3.2.1.1 Généralités

Les connaissances sur les monocytes et les macrophages ont beaucoup évolué au cours de dernières années. Dans la conception établie dans les années 70's, les macrophages tissulaires dérivent des monocytes circulants, dont le précurseur est myéloïde. On distingue désormais 2 grandes catégories de macrophages. Les macrophages issus des monocytes circulants, et les macrophages résidant dans les tissus (MRT), dont l'origine embryologique est totalement différente. En effet, les MRT dérivent du sac vitellin ou du foie fœtal, colonisent certains tissus pendant le



développement embryonnaire [172], et y persistent et s'y renouvellent durant toute la vie. A l'opposé, les macrophages dérivés de monocytes ont une durée de vie limitée dans les tissus, et ne s'y renouvellent pas.

A l'état d'homéostasie, certains organes dits « fermés » ne sont colonisés que par des MRT. C'est le cas de l'épiderme (cellules de Langherans), du système nerveux central (microglie), des poumons (macrophages alvéolaires) et du foie (cellules de Kupffer). Les organes « ouverts » sont, à l'âge adulte, quasi-uniquement colonisés par des macrophages dérivés des monocytes (**Figure 16**).



**Figure 16, d'après [172]** : Ontogénèse des macrophages tissulaires en état d'homéostasie (en l'absence de processus inflammatoire). Dans les tissus dits « fermés », les macrophages résidant dans les tissus peuvent être issus du sac vitellin (A : c'est le cas de la microglie du système nerveux central), du foie fœtal (C : macrophages alvéolaires) ou bien des 2 (B : macrophages de l'épiderme, et D : cellules de Kupffer). Dans les tissus « ouverts » les macrophages sont issus des monocytes circulants qui se différencient en macrophages avec des cinétiques de remplacement qui peuvent être lentes (cœur, pancréas) ou rapides (intestin, derme), spécifiques à chaque tissu.



Les monocytes et les 2 grandes catégories de macrophages vues ci-dessus font partie, avec les cellules dendritiques, du système phagocytaire mononucléé.

Les macrophages éliminent les PNN apoptotiques, les cellules mortes et les débris cellulaires, favorisant ainsi la résolution des processus inflammatoires. Les monocytes/macrophages sécrètent des quantités très importantes de cytokines (10 à 100 fois plus que les PNN) et régulent ainsi la réponse immunitaire. Au cours d'une réponse inflammatoire, les monocytes gagnent les tissus quelques heures après les PNN, dont ils partagent les mécanismes de migration par diapédèse. Les monocytes/macrophages reconnaissent les pathogènes via les PRRs, et les récepteurs pour les dérivés du complément et pour les fragments Fc des Immunoglobulines. En fonction de leur environnement, les macrophages peuvent schématiquement se polariser de 2 façons : M1) sécrétion massive de cytokines pro-inflammatoires sous l'influence de l'IFN- $\gamma$ , ou M2) sécrétion de cytokines anti-inflammatoires sous l'influence de l'IL-4 et l'IL-13.

Les monocytes et les macrophages sont, tout comme les cellules dendritiques et les LB des cellules présentatrices d'antigènes (CPA), capables de charger un antigène sur le CMH de classe I mais également de classe II et de stimuler ainsi les LTCD4<sup>+</sup> et CD8<sup>+</sup> [173].

Ils sont définis en immuno-marquage chez l'homme par la présence à leur surface de CD14 et CD33. Chez la souris, les marqueurs les plus utilisés sont CD11b, Mac-1 et F4/80 ; en CMF, ils peuvent être définis par les marquages CD45<sup>+</sup>/Ly6G<sup>-</sup>/CD11c<sup>+</sup>/CD64<sup>+</sup>/CD11b<sup>+</sup> [139].

### 3.2.1.2 Rôle dans l'immunité anti-HSV-1

Le rôle des macrophages dans l'infection par HSV-1 a été mis en évidence sur des modèles murins d'infection. Les macrophages constituent en effet le type cellulaire prédominant dans les cornées des souris inoculées avec HSV-1 par scarification cornéenne.

La déplétion des macrophages induisait chez les souris infectées par scarification cornéenne (et préalablement immunisées avec des glycoprotéines d'enveloppe) une augmentation de la réplication d'HSV-1 au niveau oculaire aux temps précoces de l'infection. En revanche, cette déplétion n'avait aucun effet sur la latence virale dans le TG des animaux infectés [174]. Cathcart et al. observaient sur des souris BALB/c infectées par injection intracaméculaire (dans la chambre



antérieure de l'œil) qu'une infiltration majeure par des macrophages des tissus intraoculaires, co-localisant avec l'IFN- $\gamma$ , était présente aux premiers jours de l'infection [175].

Plus récemment, Lee *et al.* étudiaient les rôles respectifs des macrophages M1 et M2 dans l'infection [176]. Dans un premier temps, ils montraient à l'aide d'un modèle *in vitro* que la réplication de HSV-1 était nettement moindre dans les macrophages M1. L'infection des macrophages par HSV-1 s'accompagnait d'une augmentation significative de la sécrétion de cytokine pro-inflammatoires dans les macrophages M1. Ensuite, pour analyser les effets *in vivo* d'une polarisation M1 ou M2, des souris étaient injectées par voie intramusculaire avec des plasmides codant pour l'IFN- $\gamma$  (connu pour induire une polarisation M1) ou CSF-1 (*Colony stimulating factor 1*) connu pour induire une polarisation M2), avant inoculation cornéenne. Les auteurs montraient que la polarisation M1 augmentait la réplication virale dans l'œil, la latence les transcrits de CD4, CD8 IFN- $\gamma$  et PD-1 dans le TG des souris infectées. A l'inverse, la polarisation M2 était associée à une réduction de tous ces paramètres. Bien que cet article ait fait l'objet de critiques méthodologiques fondées (voir [177]), ces données suggéraient le rôle potentiel des macrophages, et notamment de leur polarisation dans l'immunité anti-HSV-1 [176].

En utilisant le même modèle animal, Jeon *et al.* étudiaient le rôle de l'interaction PD-1/PD-L1, connu pour son rôle dans le maintien du privilège immunitaire cornéen, sur la clairance cornéenne d'HSV-1. Après inoculation des souris, l'expression de PD-L1 augmentait pour atteindre un pic à J4 p.i., concomitant d'une infiltration cornéenne par des NK, des DC et des macrophages. Le blocage de PDL-1 par des anticorps monoclonaux injectés localement (par voie sous-conjonctivale) permettait une diminution plus rapide de la charge virale cornéenne, associée à une augmentation de l'infiltrat macrophagique [178]. Ces résultats suggèrent que l'expression de PD-L1 à la surface oculaire impacte négativement la réponse immune et notamment macrophagique, à l'infection par HSV-1.



## 3.2.2 Cellules dendritiques

### 3.2.2.1 Généralités

Il existe 4 types de cellules dendritiques (ou DC pour *dendritic cells*) : 3 types de DC dites myéloïdes, et un type dérivé des monocytes. Les DC font le lien entre l'immunité innée et l'immunité adaptative [179].

#### **DC myéloïdes (mDC)**

Elles comportent les DC conventionnelles ou classiques (cDC) de type 1 et de type 2, et les DC plasmacytoïdes (pDC).

Les cDC, (CD45<sup>+</sup>/HLADR<sup>+</sup>/CD11c<sup>+</sup> chez l'homme) sont considérées comme les CPA professionnelles : elles peuvent présenter les antigènes, sécréter de grandes quantités d'IL-12, expriment des molécules de co-stimulation et disposent donc de toutes les caractéristiques nécessaires pour activer des LT.

**Les cDC de type 1** (CD141<sup>+</sup>, XCR1<sup>+</sup>, CLEC9A<sup>+</sup>) ont la capacité de capturer les cellules nécrotiques ou apoptotiques et de cross-présenter des antigènes aux LTCD8<sup>+</sup> lors des réponses antivirales ou anticancéreuses [180]. Leurs équivalents chez la souris sont les DC CD8α<sup>+</sup> (qui sont CD11b<sup>-</sup>).

**Les cDC de type 2** (CD1c<sup>+</sup>) présenteraient préférentiellement les antigènes aux LTCD4<sup>+</sup>, et seraient l'équivalent des cellules dendritiques CD11b<sup>+</sup> chez la souris [180].

**Les pDC**, (CD11c<sup>-</sup>CD123<sup>high</sup>, chez l'homme et la souris) qui doivent leur nom à leur ressemblance morphologique avec des plasmocytes, ont la capacité de produire de grandes quantités d'IFN-α après activation.

#### **DC dérivées des monocytes**

Les DC dérivées des monocytes ont un phénotype proche des cDC de type 2, elles ont un précurseur commun avec les macrophages. Elles se différencient *in situ* à partir de monocytes recrutés sur le site de l'inflammation [179].



### Recrutement des DC

Les DC sont très nombreuses dans tous les tissus en contact avec le milieu extérieur, notamment au sein des épithéliums cutanéomuqueux. Leur recrutement est dépendant des chémokines qui sont produites sur le site de l'inflammation par les cellules de l'immunité innée ou les cellules épithéliales. Les DC immatures expriment un répertoire de récepteurs aux chémokines inflammatoires, telles que le GM-CSF et le CCL20 / MIP-3 $\alpha$  (*Macrophage Inflammatory Protein-3 $\alpha$* ). Ces deux facteurs sont produits par les tissus inflammatoires (surtout les épithéliums). Les DC reconnaissent les microorganismes grâce à des PRR (dont les TLR).

### Capture de l'antigène

Après un contact avec l'agent infectieux ou stimulation par des cytokines inflammatoires, les DC immatures capturent les antigènes reconnus par différents mécanismes (endocytose, macropinocytose ou phagocytose). L'internalisation de l'antigène est un processus propre aux DC immatures qui diminue au cours de leur maturation.

### Maturation des DC et présentation de l'antigène

Pendant leur activation, les DC interagissent avec d'autres effecteurs de l'immunité présents sur le site (PNN, NK...). En fonction de ces interactions et de l'environnement cytokinique, les DC entrent dans un programme spécifique de maturation induisant au final différents types de réponses T. Les DC orchestrent donc les différents acteurs de l'immunité et font ainsi le relai entre la réponse innée et la réponse adaptative. Les DC matures expriment à leur surface de grandes quantités de molécules du CMH et des molécules de co-stimulation dédiées à la présentation de l'antigène.

### Migration des cellules dendritiques

Grâce à leur propriété de migration au cours de la maturation, les DC font le lien entre la périphérie (site de l'inflammation) et les organes lymphoïdes secondaires. Après activation, les DC quittent ainsi les tissus inflammatoires et entrent dans la circulation lymphatique vers les ganglions lymphatiques de drainage.

### Activation des lymphocytes par les cellules dendritiques

Les DC matures délivrent alors aux LT les signaux d'activation, de prolifération et de différenciation qui leur sont nécessaires. L'interaction DC-LT implique la reconnaissance du peptide



par le récepteur T (TCR) associé au complexe CD3, les molécules du CMH, les molécules de co-stimulation et les molécules d'adhésion. Les DC activent et régulent ainsi la réponse immunitaire en polarisant les LT vers la voie de différenciation la plus adaptée à l'agression. Une interaction avec des DC matures est nécessaire pour une survie à long terme des LT et leur différenciation en cellules mémoire.

### 3.2.2.2 Rôles dans l'immunité anti-HSV-1

Il existe désormais de nombreux arguments en faveur d'un rôle important joué par les DC dans le contrôle de l'infection par HSV-1, et notamment dans la transition entre l'immunité innée et l'immunité adaptative [181].

Les pDC produisent de grandes quantités d'IFN- $\alpha$  en réponse à l'infection par HSV-1, chez l'homme et sur des modèles murins. Cette sécrétion dépend en partie d'une stimulation des TLR9, mais aussi d'autres mécanismes [182]. Pollara et al. ont en effet montré que la fixation de la glycoprotéine D sur les cDC provoque la sécrétion d'IFN de type I par ces cellules et leur maturation [183].

Par ailleurs, les DC immatures peuvent être infectées par HSV-1. Selon Bosjnak et al., elles deviennent alors apoptotiques et peuvent être phagocytées par d'autres DC qui peuvent présenter les antigènes viraux aux LT cytotoxiques [184]. Les cellules infectées peuvent correspondre à des DC « périphériques », qui effectueraient ce « transfert » après migration dans les organes lymphoïdes [185].

L'activation des pDC par HSV-1, concomitamment à la production d'IFN de type 1, stimule la production d'IFN  $\gamma$  et d'IL10 par des LTCD4<sup>+</sup> naïfs. Mais également la migration de LT et NK activés par la production de CCL4 et CXCL10 [181].

Réciproquement, sur des souris C57BL/6, habituellement résistantes à l'infection par HSV-1, la déplétion en DC entraîne des infections sévères du système nerveux central, une activation déficiente des NK, des LTCD4<sup>+</sup> et des LTCD8<sup>+</sup> [186]. De même, un faible nombre de pDC a été associé à des infections récurrentes à HSV-1 chez l'homme [187]

Dans les tissus périphériques, les LTCD8<sup>+</sup> mémoires spécifiques d'HSV-1 sont stimulés par une interaction avec les LTCD4<sup>+</sup> et les DC recrutés dans la circulation sanguine [181]. Selon



le mode d'infection, la présentation antigénique aux LTCD4<sup>+</sup> et LTCD8<sup>+</sup> pourrait se faire soit par les DC périphériques, soit par les DC des organes lymphoïdes [188].

### **3.3 Réponse immunitaire adaptative**

#### **3.3.1 Réponse humorale**

Dans le contexte de l'infection par HSV-1, l'immunité humorale est définie par la sécrétion par les LB d'anticorps neutralisants dont les principales cibles sont les glycoprotéines d'enveloppe de HSV-1 (gD et gB). Ces anticorps ne sont toutefois pas capables d'éradiquer le virus, même s'ils pourraient jouer un rôle pour diminuer/ raccourcir les symptômes des récurrences.

Les premières données expérimentales avaient notamment montré que le transfert passif de sérum d'une souris immunisée n'avait pas d'effet sur la réplication virale locale ou dans le système nerveux, mais semblait avoir une incidence sur la sévérité des atteintes neurologiques [189]. A ce propos, sachant qu'HSV-1 est considéré comme un potentiel agent causal de la maladie d'Alzheimer, Mancuso et al., en comparant des patients atteints d'Alzheimer et des contrôles ont montré que le taux d'anticorps anti-HSV-1 était protecteur, notamment en termes de volume de la matière grise du SNC [190].

De même, il a été observé que lors d'infection oculaire de souris déficientes en cellules B, les symptômes et la susceptibilité à l'encéphalite herpétique sont accrus, de même que les atteintes oculaires [191]. Par conséquent, la contribution spécifique de l'immunité humorale n'est pas négligeable, mais c'est probablement son interaction avec d'autres effecteurs de l'immunité tels que les cellules T qui permet de contrôler de manière efficace l'infection à HSV-1, notamment la fréquence et la sévérité des récurrences.

Le rôle de la réponse humorale a récemment été remis à l'honneur dans un travail publié par Royer et al. [192]. Les auteurs vaccinaient des souris avec un vaccin vivant atténué, délété pour la séquence de signalisation nucléaire d'ICP0 (souche ICP0 $\Delta$ NLS), ou un vaccin sous unitaire (gD + adjuvant). Après inoculation par scarification cornéenne, la souche ICP0 $\Delta$ NLS conféraient une meilleure protection contre la réplication virale, les atteintes oculaires (néovascularisation cornéenne notamment) et la mortalité que le vaccin sous-unitaire. En outre, l'efficacité vaccinale était corrélée



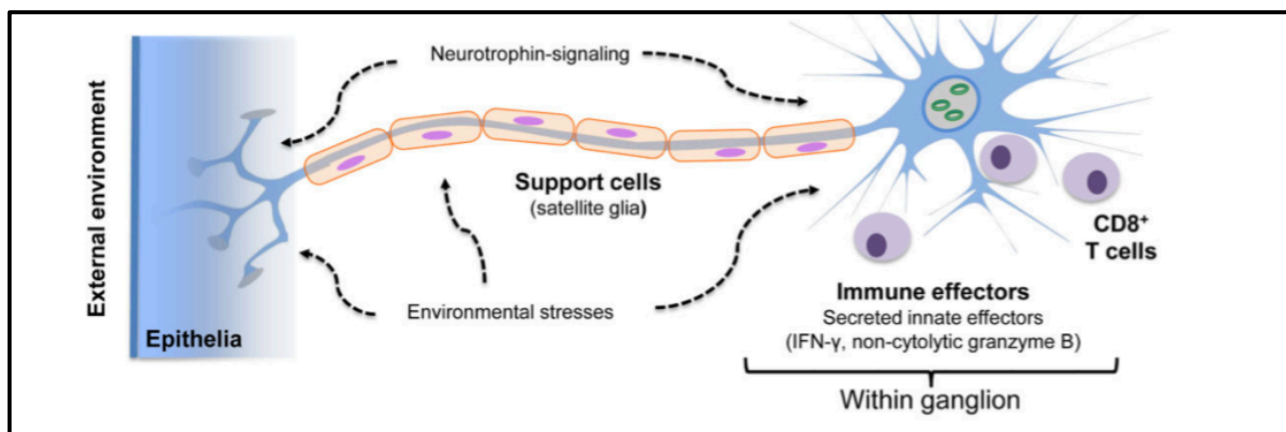


aux taux d'anticorps neutralisants. Enfin, l'immunisation passive de souris avec les sérums des souris vaccinées permettait une protection contre la néovascularisation cornéenne, la sécrétion virale et la latence (définie par le nombre de copie de LAT par TG) [193].

### 3.3.2 Réponse cellulaire

La réponse cellulaire T, médiée par les LTCD4<sup>+</sup> et aux LTCD8<sup>+</sup>, joue un rôle prédominant dans le contrôle de l'infection à HSV-1. Le rôle des LTCD8<sup>+</sup> dans le contrôle de l'infection aiguë et dans le maintien de la latence a été largement décrit. Dans les modèles d'infection cutanée par HSV-1, ils permettent notamment de contrôler la réplication virale au site d'inoculation, mais n'empêchent pas la dissémination du virus aux ganglions nerveux sensitifs [194 195].

Les LTCD8<sup>+</sup> infiltrent précocement le TG et persistent durant toute la vie de l'hôte [196]. Les LTCD8<sup>+</sup> activés viennent au contact des neurones infectés, formant ainsi une « synapse immunologique » [93] (**Figure 18**). Ils jouent un rôle dans le blocage de la réactivation virale.



**Figure 17, d'après [100]** Les LTCD8<sup>+</sup> spécifiques de HSV-1 sont au contact des neurones infectés et bloquent la réactivation virale en sécrétant de l'IFN-γ et d'autres facteurs non cytolytiques comme le granzyme B.

Ces phénomènes ont pu être observés chez l'homme, où après une première phase d'expansion clonale, les LTCD8<sup>+</sup> s'organisent autour des neurones du TG hébergeant HSV-1 en latence [197]. Ces cellules expriment des chémokines et des récepteurs aux chémokines, ainsi que des molécules cytotoxiques (IFN<sub>γ</sub>, granzyme A et B)[197], essentiels pour le contrôle de l'activité de l'infection [198]. Toutefois, les neurones hébergeant le transcrit LAT résistent à la mort



cellulaire immunogène [199]. Ceci aboutit à une activité inflammatoire des LT exacerbée, qui se caractérise par un relargage continu de chémokines et de granzyme [200] et peut conduire à un épuisement des LTCD8<sup>+</sup>. Une étude a d'ailleurs récemment montré que les LT des patients atteints de récurrences herpétiques présentaient des déficiences fonctionnelles et des marqueurs d'épuisement (expression de PD-1 et TIGIT), alors que la réponse T globale contre HSV-1 était similaire chez les patients infectés, qu'ils présentent ou non des récurrences cliniques [201]. L'expression par les neurones des récepteurs qui induisent l'épuisement des LT semble déclenchée par les cytokines cytotoxiques (IFN $\gamma$ , granzyme)[202]. L'environnement immunitaire du TG est donc un processus dynamique, et l'activité de HSV-1 semble donc contrôlée par un processus impliquant des LT et leur épuisement.

### **3.3.3 Mécanismes d'échappement d'HSV-1 à la réponse immune adaptative**

Le mécanisme d'échappement le mieux décrit dans ce contexte est l'inhibition de la présentation antigénique et de l'activation des LTCD8<sup>+</sup> par HSV-1. En effet, en bloquant la protéine de transport TAP, ICP47 inhibe le transport des peptides antigéniques vers le réticulum endoplasmique qui constitue le site d'assemblage au CMH I [203].

HSV-1 semble également capable d'inhiber l'activation des LTCD4<sup>+</sup> et leur sécrétion de cytokine. Barcy & Corey montraient en effet sur un modèle in vitro que la protéine ICP22 diminuait la capacité de cellules humaines lymphoblastoïdes (ayant des propriétés de CPA) infectées par HSV-1 à activer des LTCD4<sup>+</sup> [204]. En revanche, cette inhibition n'est pas associée à une diminution de l'expression de CMH II ou de molécules co-stimulatrices à la surface cellulaire [204].

Plus récemment, à l'aide d'un modèle murin, Koyanagi et *al.* montraient qu'une kinase virale (codée par UL13) inhibait la sécrétion de la chémokine CXCL9, et par ce mécanisme, l'accumulation aux sites d'infection de LTCD8<sup>+</sup> spécifiques d'HSV-1 [205].



## 4 Stratégies vaccinales anti-HSV-1

Malgré de nombreuses tentatives (précliniques et cliniques), aucune stratégie vaccinale anti-HSV-1 (ni même anti-HSV-2) n'a fait preuve d'une efficacité suffisante pour être appliquée en clinique. En revanche, plusieurs vaccins efficaces contre le virus de varicelle et du zona (VZV), un *Alphaherpesvirus* très proche de HSV, sont désormais disponibles.

### 4.1 Le modèle des vaccins anti-VZV

Le VZV est responsable de 2 pathologies : la varicelle, lors de la primo-infection, et le zona, lors des réactivations. Deux catégories de vaccins anti-VZV sont désormais disponibles.

#### 4.1.1 Vaccins vivants atténués

Les vaccins anti-VZV basés sur la souche Oka ont constitué les premiers vaccins efficaces contre un *Herpesviridae*. Cette souche, isolée au Japon chez un enfant atteint de varicelle, a été atténuée de façon empirique par passages successifs sur des fibroblastes humains, puis d'embryons de cochon d'inde et enfin à nouveau sur fibroblastes humains [206].

##### 4.1.1.1 Vaccins anti-varicelle

Aujourd'hui, **deux vaccins monovalents contre la varicelle** sont disponibles, et ont reçu l'autorisation de mise sur le marché (AMM) pour les enfants immunocompétents âgés de plus de 12 mois : le Varivax®, (souche Oka-Merck, laboratoire Sanofi Pasteur MSD) et le Varilix® (souche Oka-RIT, laboratoire Glaxo-Smith-Kline). Les deux souches (Oka-Merck et Oka-RIT) ont été obtenues par des procédés d'atténuation très proches, et ne diffèrent que par 36 nucléotides, dont seuls 14 sont impliqués dans des substitutions d'acides aminés [207]. Ces vaccins d'administrent par voie intra-musculaire ou sous-cutanée.

Par ailleurs, deux vaccins tétravalents (rougeole-oreillons-rubéole-varicelle) ont été développés par ces laboratoires pour simplifier le calendrier vaccinal.

L'efficacité du vaccin anti-varicelle dépend en partie de l'âge à la vaccination (le vaccin semble plus efficace après 15 mois [208]), mais surtout du nombre de doses (une ou deux). Elle diminue progressivement après la vaccination. La protection globale est de l'ordre de 80%, après une dose, et 92% après 2 doses. Par contre, une dose suffit à protéger 98% des patients vaccinés



contre les formes modérées à sévères et 100% contre les formes sévères [209]. L'efficacité de protection est bien corrélée au titre des anticorps dirigés contre les glycoprotéines virales de surface [210] , même si cette corrélation semble plus statistique que mécanistique [211].

#### **4.1.1.2 Vaccin anti-zona**

Le zona, qui correspond une réactivation de VZV, est la conséquence d'une perte liée à l'âge de l'immunité cellulaire spécifique du VZV. Qi et al. ont d'ailleurs démontré une forte corrélation entre l'augmentation de l'incidence du zona et la diminution des LT spécifiques de VZV productrices d'IFN- $\gamma$  [212]. Le taux d'anticorps spécifiques anti-VZV ne diminue quant à lui pas avec l'âge, mais semble toutefois insuffisant pour prévenir à lui seul les réactivations [212]. La vaccination a donc pour but d'augmenter la réponse T spécifique contre VZV [213].

Le vaccin anti-zona Zostavax® (laboratoire Sanofi Pasteur MSD) contient la souche Oka-Merck à une concentration 14 fois supérieure à celle du vaccin anti-varicelle. Cette concentration est nécessaire pour contrebalancer les effets de l'immunosénescence chez la population cible.

Le Zostavax® a reçu en France une AMM en prévention du zona et des algies post-zostériennes chez les adultes immunocompétents de plus de 50 ans (il n'est remboursé qu'après 65 ans). Il permet de réduire de moitié l'incidence du zona et de 66% les algies post-zostériennes [214], mais la protection contre le zona diminue avec l'âge de la vaccination, passant de 70% entre 50 et 60 ans, à 37% après 70 ans. Après plus de 10 ans d'utilisation aux États-Unis, l'étude des données de tolérance est rassurante. Les cas de zona post-vaccination sont dans la plupart des cas liés au virus sauvage. Les exceptionnels cas de zona liés à la souche vaccinale sont apparus chez des patients immunodéprimés [215]. En revanche, l'effet du vaccin diminue avec le temps, et n'est plus significative après 8 ans, suggérant que des ré-injections seraient probablement nécessaires pour assurer une protection pérenne [216].

#### **4.1.2 Vaccin sous-unitaire**

Un vaccin anti-zona sous-unitaire est disponible aux Etats-Unis depuis octobre 2017. Il a été autorisé en Europe en mars 2018, mais n'est pas encore accessible en France. Le Shingrix® (laboratoire Glaxo-Smith-Kline) est composé de la glycoprotéine E (glycoprotéine d'enveloppe essentielle pour la réplication virale) associée à l'adjuvant AS01B (un adjuvant liposomal contenant



de la saponine) [217]. Son efficacité contre le zona semble supérieure au vaccin vivant atténué, dépassant 90%, aussi bien pour prévenir le zona que les algies post-zostériennes. En outre, cette efficacité se maintient chez les patients vaccinés entre 70 et 80 ans.

Ce vaccin induit une immunité humorale et cellulaire (LTCD4<sup>+</sup>) [217]. Il a en outre l'avantage de pouvoir être utilisé chez les patients immunodéprimés, chez qui le zona est souvent beaucoup plus sévère.

Les autorités sanitaires américaines, et en particulier l'ACIP (*Advisory Committee on Immunization practice*) recommandent désormais ce vaccin en première intention [218].

## 4.2 Les tentatives de vaccins anti-HSV-1

La grande majorité des recherches dédiées à l'élaboration d'un vaccin contre HSV ont ciblé HSV-2. La similarité de ces 2 virus, (tant génomique que dans leurs interactions avec l'hôte) permettent de transposer une partie des concepts à la protection vaccinale contre HSV-1. Nous verrons les différentes stratégies (jusque-là incomplètement efficaces), mises en œuvre dans le développement de vaccins anti-HSV.

### 4.2.1 Vaccins inactivés

Les vaccins inactivés contiennent des particules virales complètes mais sont incapables de réplication, ce qui constitue un avantage essentiel en termes de sécurité. L'inactivation peut être obtenue par divers procédés (rayonnement ultraviolets, chaleur, irradiation). Cependant, les virus inactivés induisent habituellement une réponse immunitaire assez faible et une protection moins durable que les vaccins vivants atténués. Les vaccins inactivés ont été les premiers utilisés dans le contexte d'HSV. L'efficacité de protection contre HSV s'est révélée peu concluante lors des essais cliniques conduits dans les années 30 à 60, et ce malgré l'utilisation d'adjuvants [219].

### 4.2.2 Vaccins sous-unitaires

Ces échecs, et les progrès technologiques, ont redirigé les études vers sur les vaccins sous-unitaires, également avantageux en termes de sécurité. Ces vaccins ont pour la plupart été élaborés à base de glycoprotéines virales d'enveloppe, et plus particulièrement gD et gB, connues pour être les principales cibles des anticorps neutralisants. Ces protéines sont essentielles dans l'entrée du



virus dans les cellules de l'hôte, et sont très immunogènes chez l'animal [219]. Plusieurs vaccins sous-unitaires recombinants, basées sur ces glycoprotéines, avec ou sans adjuvant, ont été évalués en clinique contre l'herpès génital, mais leur efficacité s'est révélée très modeste [220-222]. Ils permettaient au mieux de réduire la fréquence des récurrences chez les patients séronégatifs au moment de la vaccination, mais pas chez les patients séropositifs pour HSV-1 et/ou HSV-2. En outre, il est apparu que le taux d'anticorps neutralisants spécifiques des glycoprotéines virales présent dans le sérum des patients ne constituait pas un corrélat de protection [219].

#### **4.2.3 Vaccins vivants atténués**

Ils sont le plus souvent obtenus par invalidation de gènes codant pour des protéines majeures du cycle viral conférant une atténuation de la virulence tout en stimulant une réponse immune humorale et cellulaire robuste. Dans cette catégorie, on distingue les vaccins à réplication limitée ou non réplicatifs et les vaccins réplicatifs.

##### **4.2.3.1 Vaccins non réplicatifs**

Les vaccins non réplicatifs ont l'avantage théorique d'un meilleur profil en terme de sécurité. Cette approche implique en effet l'invalidation de gène(s) indispensable(s) pour la réplication virale. Les virus sont obtenus sur des lignées cellulaires spécifiques qui compensent la protéine virale déficiente. Lors de la vaccination, ils sont capables d'infecter une cellule normale, mais ils ne sont pas capables de synthétiser le gène délété, et donc de produire de nouveaux virions. L'infection est donc limitée à un cycle sans dissémination à d'autres cellules.

De nombreux candidats de cette catégorie ont été employés dans des modèles expérimentaux. N'Guyen et al. testaient des virus HSV-1 issus de la souche KOS, délétés pour les gènes d'ICP4, ICP27 ou encore ICP8 (indispensable pour la réplication de l'ADN viral). Ces virus, inoculés par voie intrapéritonéale, n'induisaient aucune pathologie, et protégeaient contre la mortalité et les signes d'infection les animaux challengés 3 semaines plus tard avec la souche virulente [223]. En outre, ils induisaient une réponse humorale et cellulaire spécifique.

Hoshino et al. utilisaient une souche d'HSV-2 invalidés pour plusieurs gènes indispensables à la réplication, en l'occurrence UL5 (codant pour un composant du complexe hélicase primase) et



UL29 (codant pour ICP8) dans la souche HSV2 dl5-29, auxquels ils ajoutaient UL41 (codant pour VHS) dans la souche HSV-2 dl5-29-41. Ils montraient à l'aide de 2 modèles animaux (souris et cochon d'Inde) que ces deux souches étaient efficaces pour protéger contre un challenge létal par une souche virulente d'HSV-2, et n'étaient pas pathogènes chez des animaux sévèrement immunodéprimés [224].

Toutefois, le problème des virus non répliquatifs est qu'ils peuvent théoriquement regagner leur capacité répliquative en présence d'une souche sauvage, par un phénomène appelé transcomplémentation. Pour limiter ce risque potentiel, Yao et Eriksson ont développé une souche d'HSV-1 exprimant une protéine (UL9-C535C) se fixant sur le gène UL9 (codant pour ICP8, qui rappelons-le, est indispensable à la réplication de l'ADN d'HSV-1 et 2) et inhibant sa transcription (effet trans-dominant négatif). Cette souche (CJ83193) a donc la capacité d'infecter des cellules, mais ne se réplique pas, et surtout, bloque la réplication d'autres souches potentiellement présentes dans les cellules infectées [225]. La souche CJ83193 a été étudiée chez la souris par Augustinova et al. Elle ne générant pas de réplication virale intra-cornéenne après inoculation par scarification, et ne se réactivait pas à partir de TG infectés en phase latente. Utilisée comme souche vaccinale, elle diminuait la charge virale d'une souche virulente dans la cornée et les TG, mais ne bloquait pas totalement la réplication de cette dernière, ni la réactivation à partir de la latence [226].

Afin d'améliorer l'efficacité de la souche CJ83193, Brans et al. augmentaient son immunogénicité en remplaçant le gène UL9 de cette souche par une copie supplémentaire de la glycoprotéine D [227 228], tout en conservant sa capacité à exprimer la protéine UL9-C535C. La souche obtenue (dénommée CJ9-gD) était plus efficace en terme de protection que CJ83193 sur un modèle murin de kératite à HSV-1 [229], mais également sur un modèle d'infection cutanée à HSV-1 et d'infection génitale par HSV-2 chez le cochon d'Inde [227 230]. Cette nouvelle souche induisait dans ces différents modèles une forte réponse humorale et une réponse cellulaire spécifique contre HSV-1 et HSV-2, mais n'était pas vraiment plus efficace pour bloquer la réactivation. C'est peut-être la raison pour laquelle ce modèle vaccinal n'a jamais donné lieu à des essais cliniques.



#### 4.2.3.2 Vaccins réplicatifs

Cette stratégie présente de nombreux avantages : la réplication virale permet l'expression de l'ensemble du répertoire antigénique, ce qui peut éventuellement améliorer l'immunogénicité du candidat vaccinal.

Par contre, ces vaccins conservent une capacité de réplication, ce qui peut poser des problèmes chez les patients dont le système immunitaire est immature (enfants) ou compromis. De nombreuses protéines ont fait l'objet d'une invalidation dans la perspective de vaccination par des vaccins vivants atténués, le plus souvent sur des modèles d'herpès génital impliquant HSV-2 (gE, gH, gK, ICP34.5, UL55-56, UL43.5, US10-12, UL5, UL29, UL42, ICP27, et ICP0 [231]) Nous nous intéresserons ci-dessous aux candidats qui nous ont paru les plus prometteurs.

##### Glycoprotéine H

Le virus délété pour la glycoprotéine H (nécessaire pour l'entrée du virus dans la cellule), construit sur la base de la souche SC16 a été considéré par ses auteurs comme un virus non réplicatif. Toutefois, les conséquences de cette délétion ne sont pas très claires. Les cellules normales peuvent être infectées par ce virus (en raison probablement de l'importance de l'inoculum), produisent des virions, mais ces derniers ne sont pas infectants. Quoiqu'il en soit, les résultats sur un modèle murin d'inoculation cutanée auriculaire, où la souche induisait une protection clinique et des anticorps neutralisants, étaient concluants [232]. Si bien qu'une variante de cette souche, sur la base d'HSV-2 était utilisée dans un essai clinique randomisé multicentrique contrôlé contre placebo incluant des patients souffrant d'au moins 6 récurrences d'herpès génital par an. Les injections du virus vaccinal étaient réalisées par voie sous-cutanée dans le bras. Plusieurs protocoles, comprenant 1 à 4 injections espacées de 2 semaines, à la dose de  $10^6$ PFU par injection, étaient comparés. Il n'y avait malheureusement aucune différence entre les groupes concernant le nombre de récurrences, le temps de guérison, ainsi que la sécrétion asymptomatique de virus [233].

##### ICP0

Comme nous l'avons vu, la protéine ICP0, est une protéine transactivatrice IE jouant un rôle crucial dans l'initiation du cycle lytique. Plusieurs auteurs ont tenté de protéger des animaux à l'aide de virus dont la fonction d'ICP0 était altérée. Haford et al. utilisaient une souche d'HSV-2





délétée pour la séquence de signalisation nucléaire d'ICP0 (HSV2-ICP0ΔNLS). Les souris étaient immunisées par injection dans le coussinet plantaire, puis challengées au même site, mais également par voie vaginale, nasale ou oculaire avec  $125.10^3$  PFU d'une souche virulente. Ils comparaient cette stratégie à vaccin sous unitaire (gD + adjuvant) [234]. Les souris vaccinées par le virus vivant atténué survivaient toutes à l'inoculation (114/115 versus 3/ 45 dans le groupe vacciné par gD), et avaient une excrétion virale très nettement diminuée aux différents sites.

Plus récemment, Royer et al. reproduisaient à peu de chose près ces expérimentations, mais cette fois-ci avec une souche ICP0ΔNLS dérivée d'HSV-1, dans un modèle murin d'infection oculaire. De manière identique, ils comparaient ce candidat à un vaccin sous-unitaire (gD + adjuvant). Après inoculation par scarification cornéenne, la souche ICP0ΔNLS conféraient une meilleure protection contre la réplication virale, les atteintes oculaires (néovascularisation cornéenne notamment) et la mortalité que le vaccin sous-unitaire. En outre, l'efficacité vaccinale était corrélée aux taux d'anticorps neutralisants. Enfin, l'immunisation passive de souris avec les sérums des souris vaccinées permettait une protection contre la néovascularisation cornéenne, la sécrétion virale et la latence [192].

### Glycoprotéine E

La glycoprotéine E est nécessaire pour la propagation de l'infection dans les tissus épithéliaux polarisés, le transport antérograde des capsides virales, du tégument et des glycoprotéines du corps cellulaire neuronal vers les terminaisons axonales. Brittle et al. ont testé l'efficacité d'une souche d'HSV-1 délétée pour la gE sur un modèle murin. Le vaccin était inoculé par scarification cutanée sur le flanc de l'animal, de même que la souche virulente (HSV-1 ou HSV-2), 4 semaines plus tard. Les souches virulentes se répliquaient (à des titres faibles) au site d'inoculation. Toutefois, les animaux vaccinés étaient protégés contre la mort, et présentaient des signes cliniques moins sévères au site d'inoculation. La souche virulente était retrouvée dans les ganglions sensitifs de la racine dorsale (zone de latence après une inoculation sur le flanc) chez moins de 10% des animaux vaccinés, contre 100% dans le groupe contrôle [235].



## Glycoprotéine K

Iyer et al. ont récemment étudié l'efficacité protectrice d'une souche d'HSV-1 délétée pour la gK [231]. Du fait de la délétion, ce virus ne peut pas infecter les neurones [51]. En revanche, il se multiplie de manière efficace dans tous les autres types cellulaires et semble induire une réponse cellulaire T durable. Des souris BalB/C de 6 semaines étaient vaccinées avec  $10^6$  PFU de la souche vaccinale par voie intramusculaire, puis challengées 14 jours après par voie intra vaginale avec des souches virulentes d'HSV-1 (McKrae) ou d'HSV-2 (HSV2-G). Les animaux vaccinés avaient une morbi/mortalité significativement diminuée, (survie de 90% vs 10 dans le groupe HSV-1 et 70% versus 0 avec HSV-2). Les auteurs retrouvaient des LT mémoires spécifiques des gB et gD jusqu'à 7 mois après la vaccination [231].

Ces résultats, très encourageants pour certains, et très décevants pour d'autres, posent plusieurs problèmes conceptuels dans la stratégie à mettre en place pour mettre au point un candidat vaccinal contre HSV.

D'une part, on peut s'interroger sur la validité et l'hétérogénéité des modèles animaux d'inoculation et de challenge, dans l'étude des phénomènes cliniques et immunologiques, mais également sur la quasi-absence d'étude expérimentale sur les capacités de ces candidats à protéger contre les réactivations. En outre, la persistance à vie du candidat vaccinal dans les neurones sensitifs des sujets vaccinés (sauf a priori pour la souche gK<sup>-</sup>), pose question en ce qui concerne la sécurité. Enfin, on voit bien que la question de la population cible (déjà immunisée contre HSV-1 et/ou HSV-2, ou au contraire non infectée), n'est pas tranchée.



# Chapitre II : Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus Herpès simplex type 1 après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal

## 1 Résultats obtenus récemment par l'équipe

Comme vu précédemment, les atteintes oculaires herpétiques sont quasiment toujours unilatérales chez l'homme, et récidivent du même côté. Il en va de même pour l'atteinte oculaire dans le modèle murin oro-oculaire développé dans notre équipe [116 120].

Dans ce dernier, alors même que les quantités de LAT en RT-PCR sont équivalentes entre les deux TG, certains neurones du TG gauche (ipsilatéraux à l'inoculation) en expriment en quantités suffisantes pour être détectées par hybridation *in situ*, ce qui n'est pas le cas du côté droit [120]. Or, la relation entre expression des LAT par les neurones et capacité de réactivation de HSV-1 a été précédemment décrite (sans pour autant être élucidée) [79], et dans notre modèle, les TG gauches (ipsilatéraux à l'inoculation labiale) ont une plus grande capacité de réactivation. Notre hypothèse de travail est que les premiers temps de la dissémination du virus dans les divers éléments du système nerveux sensitif conditionnent ces derniers pour leur susceptibilité ultérieure au phénomène de réactivation.

En d'autres termes, nous avons émis l'hypothèse que les premiers tissus neuronaux sensitifs atteints par le virus (gauches dans notre modèle) peuvent héberger une infection latente capable de réactivation ultérieure, alors que ceux atteints quelques jours plus tard (côté droit) peuvent contraindre le virus à une infection latente définitive, probablement grâce à l'intermédiaire de mécanismes de défense immunitaire (mis en place respectivement après l'arrivée du virus du côté gauche, mais avant l'arrivée du virus du côté droit). La capacité de ces tissus neuronaux à permettre la réactivation (mais non pas à héberger la latence), serait ainsi modifiée de façon définitive.



Pour faire la preuve de ce concept, nous avons cherché à contraindre une souche virale sauvage virulente (SC16) à développer une infection latente sans capacité de réactivation, c'est à dire comme observé du côté non-inoculé (droit) de notre modèle, et dans l'un des deux TG chez l'homme (Thèse de Nolwenn Pocard & article correspondant en **Annexe 1**).

Nous avons ainsi démontré qu'une primo-infection par une souche herpétique non-neurovirulente et non-réactivable (invalidée pour le gène de la thymidine kinase ou TK<sub>del</sub>)[236], donc uniquement capable de réplication locale au site d'inoculation, suivie d'une inoculation dans la lèvre controlatérale au moins 4 jours plus tard par une autre souche de HSV-1 pleinement virulente (SC16), induit une protection contre les signes d'infection aiguë et contre la réactivation virale (publication en cours de soumission). Ces observations suggèrent fortement qu'une pression du système immunitaire (déclenchée très rapidement par l'inoculation de la souche non-neurovirulente, qui ne peut se répliquer que dans la lèvre) est en cause dans la protection induite contre la ré-infection. Nous avons donc cherché à caractériser ces phénomènes, afin de mieux comprendre la pathogénie de l'histoire naturelle des kératites herpétiques chez l'homme, et dans un second temps de poser les bases du développement d'une stratégie préventive contre HSV-1.



## 2 Objectifs de la thèse

La compréhension des mécanismes en cause dans l'unilatéralité de l'infection récurrente, et par extension ceux induisant la protection induite par la souche TK<sub>del</sub>, serait non seulement un progrès important dans la compréhension de la balance entre infection latente et réactivation de HSV-1, mais serait surtout une ouverture majeure vers de nouvelles stratégies thérapeutiques, notamment vaccinales.

Nos objectifs sont donc de i) étudier les mécanismes immunologiques innés et adaptatifs impliqués en jeu afin de mettre en évidence, *in fine* des corrélats de protection ; pour ii) poser les bases du développement à plus long terme de stratégies préventives efficaces contre HSV-1, notamment vaccinales.



## 3 Matériel et méthodes

### 3.1 Virus et cellules

#### 3.1.1 Virus

Pour ces travaux, nous avons utilisé :

- La souche SC16 d'HSV1, dérivée d'une souche clinique pleinement virulente connue pour sa capacité à répliquer dans les cellules Vero [115]. Il s'agit par ailleurs de la souche utilisée dans le modèle murin d'infection herpétique développé par notre équipe [60]
- La souche recombinante HSV1-TK<sub>del</sub> (souche TKDM21), dérivée de SC16, contenant une délétion de 831 pb entre les nucléotides 46695 et 47526 au sein du gène codant pour la thymidine kinase (TK, codée par le gène UL23)[237].

La souche HSV1-TK<sub>del</sub> peut être considérée comme à réplication « limitée ». En effet, cette souche peut se répliquer dans des types cellulaires ayant des capacités de division (comme les cellules épithéliales), en utilisant les kinases cellulaires, mais pas dans les types cellulaires ne se divisant pas (tels que les neurones). Par conséquent, cette souche peut entrer en latence, mais ne peut pas se réactiver dans les neurones [236 237]. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une souche répliquative, mais non **neuro-virulente**.

#### 3.1.2 Cellules

Les cellules Vero (cellules épithéliales de rein du singe vert *Chlorocebus sp.* – anciennement *Cercopithecus Aethiops*) étaient utilisées pour la titration des stocks viraux par la méthode des plages de lyse. Cette lignée était choisie en raison de sa permissivité à l'infection herpétique (ces cellules présentent en effet les récepteurs membranaires nécessaires à l'entrée du virus et sont déficientes en interféron), sa capacité à entraîner des plages de lyse de grande taille (facilement comptables), et sa relative facilité de culture [238-240]. La culture cellulaire était réalisée dans un milieu de Eagle modifié de Dulbecco (*Dulbecco modified Eagle medium* ou DMEM, Gibco®, Life Technologies™, Paisley, Grande Bretagne) additionné de sérum de veau foetal (SVF, à 10%), de pénicilline (100 UI/mL), de streptomycine (100g/mL), de GlutaMAX™, de D-Glucose (4,5g/L) et de pyruvate, dans une atmosphère contrôlée à 37°C avec 5% de CO<sub>2</sub>.



## 3.2 Préparation des concentrés viraux

### 3.2.1 Infection des cellules

Des flacons de culture cellulaires T175 de cellules Vero confluentes à 90% étaient rincées avec du DMEM (6ml) puis infectées avec le virus dilué (SC16 ou TK<sub>del</sub>) à raison de  $2 \cdot 10^5$  PFU dilué dans 5ml par T175 (MOI : 0,01). Après adsorption 1 heure, en incubateur à 37°C (flacons agités toutes les 15 minutes), l'infection était bloquée par un rinçage à l'aide de 30ml de DMEM + SVF à 5% + pénicilline et streptomycine, puis les cellules infectées étaient cultivées pendant 48 heures.

### 3.2.2 Récolte des cellules infectées

Les cellules et les surnageants primaires (SN1) étaient récoltés dans des tubes de 50ml (Falcon), puis centrifugés 10minutes/800G/4°C. Chaque culot primaire (C1) était re-suspendu dans 125µl de DMEM, transféré dans un Eppendorf de 1,5ml et soniqué 3 fois pendant 30 secondes avec des intervalles de 2 minutes entre chaque sonication. Les tubes étaient ensuite centrifugés 10minutes/800G/4°C. Le surnageant secondaire obtenu (SN2) contenant le concentré viral était transféré dans des tubes. Le culot secondaire (C2) était technique selon le protocole utilisé pour C1. Le surnageant tertiaire (S3) était poolé avec S2.

*Purification sur coussin de sucrose :*

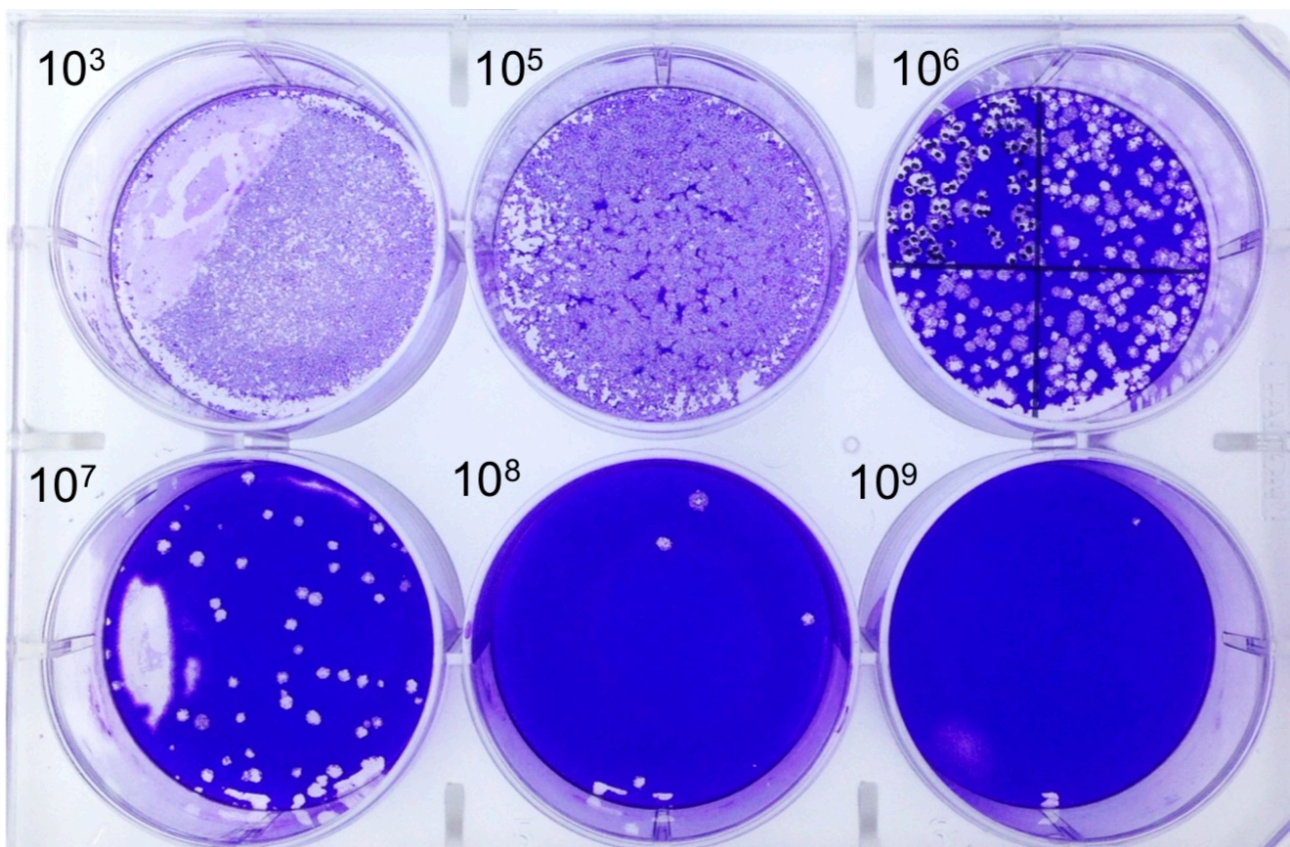
Les surnageants S1, S2 et S3 étaient poolés. On versait le sucrose dilué à 25% dans du PBS dans les tubes stériles de l'ultracentrifugeuse (2ml par tube), puis un volume de 9ml de surnageant était délicatement déposé à la surface du sucrose. Les tubes étaient disposés dans le rotor SW41 (Beckman-Coulter) et centrifugés 3heures/70 000G/4°C dans une ultracentrifugeuse (Beckman-Coulter). Après aspiration du surnageant, les culots viraux (blanchâtres) étaient re-suspendus dans 200µl de DMEM sans rouge phénol, puis soniqués 3 fois 5 secondes. Le virus concentré purifié était aliquoté par volume de 20µl.

### 3.2.3 Détermination du titre des concentrés viraux

Une aliquote de chaque concentré viral était titrée selon la méthode de plaque de lyse. Des dilutions successives de suspension virale étaient réalisées dans du milieu DMEM (non supplémenté en sérum ni antibiotique) puis déposées sur des cellules VERO confluentes en culture monocouche dans des plaques 6 puits (Falcon®), à raison de 200µl de suspension diluée par puits.



Après adsorption 1h à 37°C, l'inoculum viral était retiré puis les cellules recouvertes dans chaque puits d'1,5ml de milieu (composé de 2% de carboxyméthylcellulose (CMC), 10% de tryptose et enrichi avec 8% de SVF, 1% de pénicilline et streptomycine). Les boîtes étaient ensuite incubées à l'étuve pendant 3 jours à 37°C. Après cette période d'incubation, le milieu contenant de la carboxyméthylcellulose était retiré et le tapis cellulaire était coloré au cristal violet à 0,05% (dilué dans une solution aqueuse de formaldéhyde à 2% et d'éthanol à 50%), avec un temps d'incubation de 30 minutes. Le colorant était ensuite aspiré, les tapis cellulaires étaient rincés puis séchés à l'air libre avant lecture. Les plages de lyse étaient comptées à l'œil nu (elles apparaissaient comme une zone claire sur le fond coloré, **Figure 18**). Les titres viraux obtenus étaient de l'ordre de  $2-3 \cdot 10^9$  PFU/ml.



**Figure 18** : exemple titration de la souche SC16 d'HSV-1. Les dilutions successives de suspension virales sont réalisées sur des plaques 6 puits. Les plages de lyse correspondent aux tâches claires (absence de tapis cellulaire) sur le fond bleu (tapis cellulaire intact coloré par le crystal violet). Sur les premières dilutions ( $10^3$  et  $10^5$ ) les plages confluentes ne peuvent être comptées. En revanche, leur décompte est possible à partir de  $10^6$ . Dans cet exemple, le titre correspond à  $2,5 \cdot 10^9$  PFU/mL.



### 3.3 Techniques d'expérimentation animale

#### 3.3.1 Animaux utilisés

Des souris BALB/c femelles de six semaines (Elevage Janvier, Le Genest Saint Ile, France) étaient utilisées pour toutes les expérimentations. Ces souris recevaient un accès illimité en nourriture et en eau. Toutes les manipulations et inoculations étaient réalisées sous anesthésie générale. Ces procédures étaient en conformité avec les règles éthiques de l'expérimentation animale, notamment celles définies par l'association pour la recherche en sciences visuelles et ophtamlogie (ARVO) ainsi que celles du comité d'éthique local. Elles respectaient les recommandations des démarches éthiques appliquées à l'expérimentation animale (règle des 3R pour *Reduce-Refine-Replace*), et ont été déclarées et validées par le CEEA 59 sous le numéro 0774602.

#### 3.3.2 Inoculation des animaux, surveillance clinique et biologique

L'injection sous cutanéomuqueuse labiale supérieure était réalisée à l'aide d'une micropipette en verre faite sur mesure (par nos soins, à l'aide de capillaires en verre de 1mm de diamètre externe, Hilgenberg GmbH, Malsfeld, Allemagne) reliée à un système d'injection mécanisé (Infusion Pump, Harvard Apparatus, Les Ulis), comme décrit précédemment [20].

Le volume injecté (1µL) contenait soit une suspension d'HSV1 contenant  $10^6$  PFU, soit, dans le groupe contrôle, une solution de tampon PBS. Pendant la période de l'infection aiguë (entre le 1er jour de la première inoculation et le 10ème jour suivant la seconde inoculation), les animaux étaient traités par antalgiques à titre préventif (meloxicam 0,4 mg/kg/j dans leur eau de boisson).

Les souris étaient observées quotidiennement avec surveillance de l'apparition des signes cliniques (**Tableau 3**).

Signes systémiques	Signes oculaires
<ul style="list-style-type: none"><li>- Modification de l'aspect du pelage avec hérissément des poils,</li><li>- perte de poids,</li><li>- réduction de la mobilité,</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kératite se manifestant par une opacification, une néovascularisation et/ou, une ulcération cornéenne.</li><li>- Blépharite, avec vésicules et croûtes périoculaires.</li></ul>

**Tableau 3** : signes cliniques surveillés lors de l'inoculation des animaux avec SC16 ou TK<sub>del</sub> ou les deux souches séquentiellement.

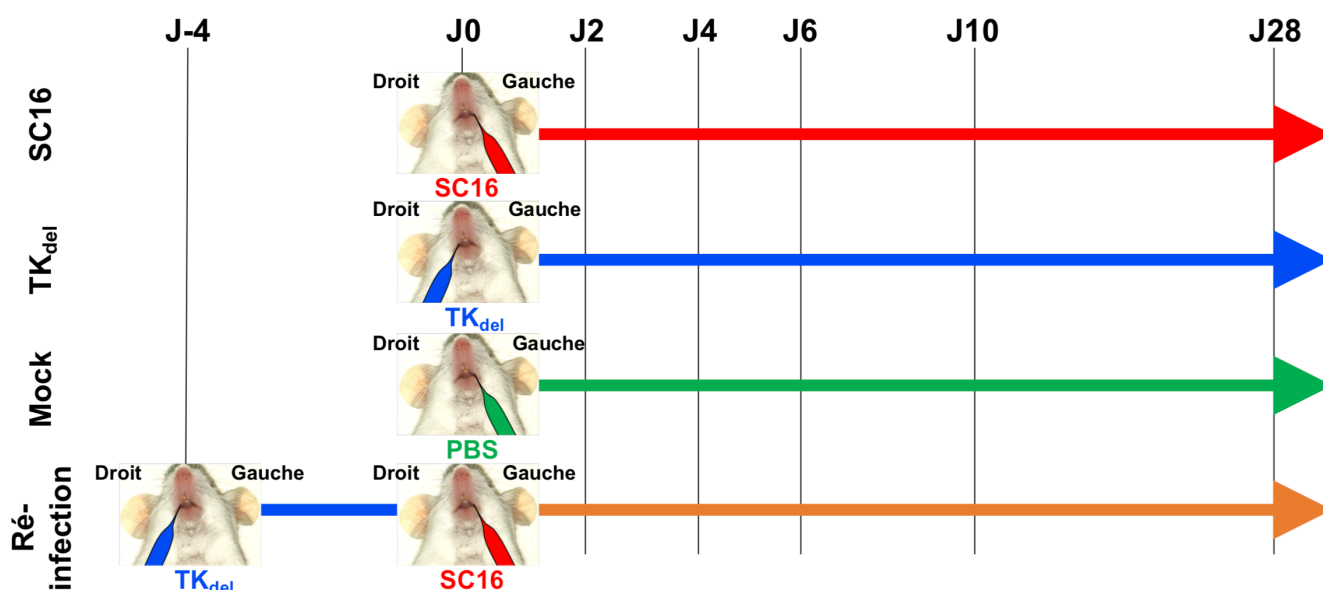


### 3.3.3 Groupes d'étude

Quatre groupes d'animaux étaient définis dans notre étude.

- **Le groupe SC16** était injecté avec 1µL du virus SC16 à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure gauche à **J0**.
- **Le groupe TK<sub>del</sub>** était injecté avec 1µL du virus TK<sub>del</sub> à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure droite à **J0**.
- **Le groupe contrôle**, était injecté avec du PBS (1µL) dans la lèvre supérieure gauche à **J0**.
- **Le groupe « réinfection »** était injecté avec 1µL du virus TK<sub>del</sub> à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure droite à **J-4** puis 1µL du virus SC16 à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure gauche à **J0**.

Les échantillons tissulaires étaient prélevés à J0 sur les souris naïves, puis à des temps clefs du cycle infectieux d'HSV1 dans notre modèle : phase aiguë précoce (**J2, J4, J6**), phase aiguë tardive (**J10**) et latence (**J28**) [60 120]. Le protocole expérimental est schématisé sur la **figure 19**.



**Figure 19** : Représentation schématique des groupes expérimentaux. En haut en bas : **groupe SC16**, injecté avec 1µL du virus SC16 à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure gauche à J0 ; **groupe TK<sub>del</sub>**, injecté avec 1µL du virus TK<sub>del</sub> à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure droite à J0 **groupe contrôle (Mock)**, injecté avec du PBS (1µL) dans la lèvre supérieure gauche à J0 ; **groupe « ré-infection »**, injecté avec 1µL du virus TK<sub>del</sub> à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure droite à J-4 puis 1µL du virus SC16 à  $10^9$ PFU/ml soit  $10^6$ PFU dans la lèvre supérieure gauche à J0.



### **3.3.4 Sacrifice des animaux / points limites**

Les animaux étaient sacrifiés par dislocation cervicale. Le protocole d'observation après inoculation était interrompu (euthanasie) si le comportement générait un doute franc sur l'existence d'une douleur importante ou d'une gêne fonctionnelle importante, c'est à dire devant l'observation d'au moins un des points limites suivants : i) agitation permanente et/ou attitude agressive vis à vis des autres animaux, ou à l'inverse ii) prostration et/ou troubles évidents de la mobilité gênant la marche de l'animal, notamment toute atteinte de la mobilité gênant l'accès à la nourriture et à la boisson disponible dans la cage ; iii) perte de poids cliniquement évidente (pesée en cas de doute, atteinte du point limite si perte de poids supérieure à 20% par rapport au poids moyen des individus en début d'expérimentation), iv) vocalisation spontanée ou déclenchée par le toucher. En cas d'apparition d'un point limite, les animaux étaient euthanasiés dans les plus brefs délais par dislocation cervicale.

## **3.4 Analyse de la réponse immunitaire**

Elle consistait en une analyse des tissus au site d'inoculation (lèvre) et d'infection (ganglion trigéminal) portant d'une part sur l'infiltrat par des cellules des lignées myéloïdes et lymphoïdes et d'autre part sur la présence de cytokines inflammatoires. Les prélèvements des échantillons étaient réalisés de la même façon dans les 2 cas.

### **3.4.1 Prélèvements des échantillons**

Après sacrifice des souris par dislocation cervicale, les tissus étaient prélevés sous hotte microbiologique à l'aide de matériel chirurgical et microchirurgical.

Les prélèvements labiaux intéressaient un fragment de 2X2X2mm comportant la muqueuse, le tissu cutané et le tissu sous-muqueux au niveau de la commissure labiale. Les portions de nerf trigéminal prélevées s'étendaient de la racine, au ras du bulbe rachidien, jusqu'à 2mm après le ganglion trigéminal, soit après la division en 3 branches. Au total, le prélèvement mesurait 4 à 5 mm. Pour la compensation du cytomètre, la rate d'une souris du groupe SC16 était également prélevée.



## 3.4.2 Etude des infiltrats immuns par cytométrie en flux

### multiparamétrique

#### 3.4.2.1 Préparation des tissus

Les tissus prélevés étaient transférés dans des tubes Eppendorf étiquetés contenant 1mL de milieu CM10 (DMEM contenant du Glutamax<sup>TM</sup>, 10% de SVF, 50µg/ml de pénicilline et streptomycine, 100 µg/ml de néomycine et 5mM de tampon HEPES) conservés sur de la glace.

#### *Dissociation des échantillons (lèvres et TG)*

Nous avons adapté des protocoles publiés, combinant digestion mécanique et enzymatique afin de produire une suspension de cellules à partir des échantillons [241 242]. Les tissus étaient disposés sur des boîtes de Pétri stériles sous hotte microbiologique et coupés en fragments à l'aide de ciseaux de Vannas (Beaver Visitec International, Eybens, France), puis transférés avec une pipette dans des tubes Falcon de 15L avec 5ml de milieu CIM10. Des solutions concentrées d'enzymes étaient ajoutées dans chaque tube (50µl par tube de collagénase de type IV dosée à 1mg/ml - Sigma-Aldrich, St Quentin Fallavier, France- et de DNase de pancréas bovin à 100µg/ml - Sigma-Aldrich, St Quentin Fallavier, France-). Ces derniers étaient incubés à 37°C pendant 25 minutes avec une agitation mécanique à 60 rotations par minute.

Le lysat obtenu était passé au travers d'une membrane microporeuse disposée sur un tube Falcon de 50ml (Cell strainer 40 µm, Corning, Samois sur-Seine, France), à l'aide du piston d'une seringue d'1ml. La membrane était rincée avec 3ml de tampon pour cytométrie en flux (PBS additionné de 2% de FCS). Après centrifugation (7 minutes/400G/4°C), et aspiration du surnageant, le culot était resuspendu dans 1ml d'une solution de particules colloïdales de silice (Percoll Plus dilué à 37%, GE Healthcare, Chicago, USA).

Les tubes étaient centrifugés (10 minutes/400G/4°C, sans frein), afin de réaliser un gradient de densité pour séparer les cellules dissociées des résidus protéiques (notamment de myéline). Les surnageants étaient aspirés et les culots cellulaires re-suspendus dans 1ml de tampon pour cytométrie en flux (tampon PBS avec 2% de SVF), puis centrifugés.



### 3.4.2.2 Immunomarquages de surface

Les culots étaient re-suspendus dans 50µl d'une solution contenant le mélange d'anticorps suivant (**tableau 4**), puis conservés 20 minutes à 4°C.

Marqueur	Type cellulaire cible	Clone	Fluorochrome	Fournisseur	Référence	Vol. par échantillon (µl)
Live Dead	Cellules mortes	-	Aqua	Fischer Scientific	L34957	0,25
Ly6C	PNN	HK1.4	PerCPcy5.5	Fischer Scientific	45-5932-80	0,25
CD8a	LTCD8	53-6.7	PECF594	BD Biosciences	562283	0,5
CD3	LT	145-2C11	PEcy7	Fischer Scientific	25-0031-81	0,25
Ly6G	NK	1A8	AF700	BD Biosciences	561236	0,25
CD11b	Macrophages / monocytes/granulocytes / NK	M1/70	APCcy7	BD Biosciences	557657	0,125
CD64	Monocytes, macrophages / DC	X54-5/7.1	BV421	Biologend	BLE139309	0,066
CD45	Cellules hématopoïétiques	30-F11	BV605	Biologend	BLE103139	0,063
IA/IE	CMH II (LB)	M5/114	BV650	BD Biosciences	563415	0,033
CD24	PNN / LB / LT / monocytes / DC	M1/69	BV711	BD Biosciences	563450	0,05
CD11c	DC/ macrophages	HL3	BV786	BD Biosciences	563735	0,5
CD4	LTCD4	GK1.5	BUV395	BD Biosciences	563790	0,5
		Tampon PBS				Pour vol. total 50µl

**Tableau 4** : mélange d'anticorps pour l'immunomarquage de surface (Vol. : volume).

Les cellules étaient ensuite lavées 2 fois par ajout d'1mL de tampon pour cytométrie en flux à chaque tube, centrifugation (500G, 3 minutes, 4°C) et aspiration. Le culot final était re-suspendu dans 150µl de tampon de fixation dilué à 10% dans de l'eau (BD cellfix 10X, BD Bioscience, Le Pont de Claix, France) et stocké à 4°C.

### 3.4.2.3 Protocole de cytométrie en flux multiparamétrique (CMF)

Les échantillons étaient analysés le même jour ou le lendemain matin de la dissociation. Avant l'acquisition de la cytométrie, on ajoutait 50µl par tube d'une solution de billes de comptage (1 tube de *trucount beads*, BD Bioscience, dilué dans 2ml de PBS). L'acquisition était réalisée sur



un cytomètre FORTESSA X20 flow (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France), en configuration 5 lasers/20 filtres.

#### 3.4.2.4 Analyse des données

La calibration du cytomètre, notamment pour les voltages et les compensations, était réalisée avec des splénocytes de souris BALB/c infectées par SC16 selon le protocole habituel d'inoculation dans la lèvre. La préparation des cellules était réalisée par dissociation mécanique, puis passage à travers un filtre (*cell strainer* 40µm), et lavées avec du tampon pour CMF (PBS + 2% SVF). Après comptage cellulaire, on disposait un million de splénocytes par tube de CMF, lesquels étaient centrifugés (500G / 3 minutes / 4°C). Le culot était re-suspendu dans 50µl de PBS, avec un marqueur par tube, mis dans la même quantité que dans le mélange précédemment décrit. Après fixation et lavage, les échantillons étaient passés au cytomètre.

La compensation était réalisée manuellement, couleur par couleur, pour réduire au maximum les overlap des spectres d'émission des fluorophores utilisés dans notre panel d'anticorps. Nous réalisons ensuite l'acquisition d'un contrôle avec un mélange des splénocytes marqués par les différentes couleurs, puis l'acquisition des échantillons.

La stratégie de définition des populations (*gating strategy*) analysées par CMF était basée sur celle décrite par Yu *et al.* [139]. Elle est détaillée dans la première section des résultats.

### 3.4.3 Détection et quantification des chémokines inflammatoires

#### 3.4.3.1 Préparation des homogénats tissulaires

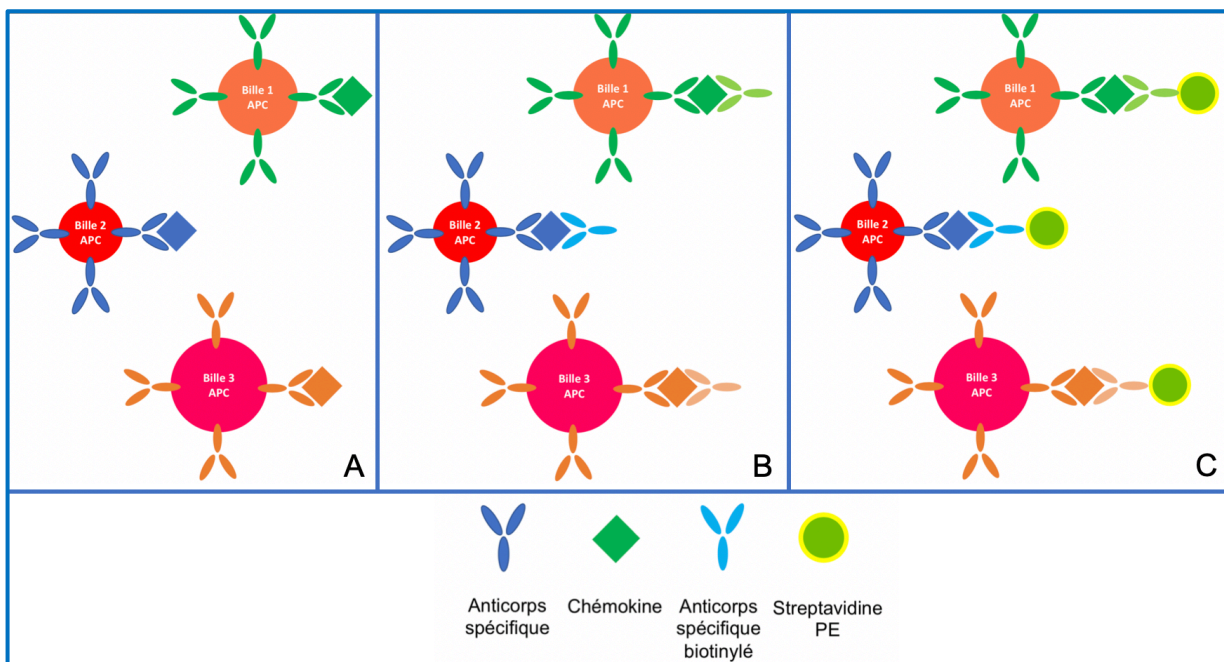
Après prélèvement, les échantillons étaient transférés dans des tubes Eppendorf de 1,5ml contenant 500µl d'un tampon de lyse cellulaire (800µl de 10X *cell lysis buffer* - Cell Signaling Technologies, Danvers, MA, USA- dilué dans 8ml d'eau distillée et 80µl de fluorure de phénylméthylsulfonyl dilué au 1/100 - Sigma-Aldrich, Saint-Quentin-Fallavier, France-) et conservés dans la glace pendant 1 heure. Les échantillons étaient ensuite transférés dans des tubes contenant des billes de céramiques pour homogénéisation (CKmix 2ml, BertinPharma, Montigny le Bretonneux, France) et eux-mêmes traités par un homogénéisateur de tissus (Precellys24, BertinPharma, Montigny le Bretonneux, France) à 6500RPM pendant 45 secondes.



L'homogénat de tissu était centrifugé (5 minutes/10 000G/4°C), le surnageant était prélevé et conservé à -20°C.

### 3.4.3.2 Principe du kit LEGENDplex

Le kit LEGENDplex (Biolegend, Paris, France) est spécifiquement dédié à la détection et à la quantification des chémokines inflammatoires de souris. La technique repose sur les principes de base d'un test immunologique en « sandwich ». De manière schématique, des billes fluorescentes couvertes d'anticorps spécifiques des chémokines, de tailles différentes et d'intensité de fluorescence (allophycocyanine, APC) différentes pour chaque chémokine (au nombre de 13), permettant d'être bien différenciées les unes des autres, sont mises en présence d'un lysat tissulaire. Après fixation des chémokines aux billes, on ajoute les anticorps spécifiques biotinylés et de la streptavidine couplée à un fluorochrome (phycoérythrine, PE). Ces anticorps secondaires se fixent aux antigènes attachés au bille. Après lavage, la préparation est analysée en cytométrie en flux qui permet de séparer chaque chémokine (en fonction de la taille et de la fluorescence APC) et de les quantifier (grâce à l'intensité de la fluorescence PE) (**Figure 20**).



**Figure 20** : Principe du kit LEGENDplex. **A)** Des billes fluorescentes couvertes d'anticorps spécifiques des chémokines, de tailles différentes et d'intensité de fluorescence (allophycocyanine, APC) différentes pour chaque chémokine (au nombre de 13), sont mises en présence d'un lysat tissulaire. Les chémokines se fixent aux billes. **B)** des anticorps spécifiques biotinylés sont ajoutés et se fixent aux antigènes attachés aux billes. **C)** La streptavidine couplée à un fluorochrome (phycoérythrine, PE) est ajoutée au mélange.



### 3.4.3.3 Réalisation du test

Le test était réalisé conformément aux instructions du fournisseur. L'ensemble des réactifs et les surnageants des lysats tissulaires étaient décongelés et portés à température ambiante. Les échantillons étaient dilués deux fois et une courbe étalon était établie en diluant des échantillons pour obtenir des concentrations finales (en pg/ml) de : 10 000 / 2 500 / 625 / 156,3 / 39,1 / 9,8 / 2,4 et un tampon était utilisé comme contrôle négatif. Les échantillons, les dilutions de la courbe étalon et les contrôles étaient incubés durant 2 heures sur un agitateur mécanique (cadencé à 500RPM) à température ambiante avec les billes du kit. Ces dernières comportent 13 types de billes, ayant chacune des paramètres spécifiques de taille et de fluorescence APC, et couvertes d'un anticorps spécifique d'une chémokine : CCL2 (MCP-1), CCL5 (RANTES), CXCL10 (IP-10), CCL11 (éotaxine-1), CCL17 (TARC), CCL3 (MIP-1 $\alpha$ ), CCL4 (MIP-1 $\beta$ ), CXCL9 (MIG), CCL20 (MIP-3 $\alpha$ ), CXCL5 (LIX), CXCL1 (KC), CXCL13 (BLC) et CCL22 (MDC). Les principaux sources et rôles biologiques de ces chémokines sont résumées dans le tableau 5.

Chémokine	Principaux rôles biologiques	Principales source cellulaires
CCL2 (MCP-1)	- Chimiotactique pour les monocytes, LT mémoire, DC	Monocytes, macrophages, DC
CCL5 (RANTES)	- Chimiotactique pour les LT, PNE, PNB - Recrutement des leucocytes aux sites inflammatoires - Prolifération et activation des NK	LT
CXCL10 (IP-10)	- Chimiotactique pour Monocytes, lymphocytes, PNB	Multiplés types cellulaires, dont monocytes, cellules endothéliales, fibroblastes
CCL11 (Eotaxine)	- Chimiotactique pour les PNE	Multiplés types cellulaires
CCL17 (TARC)	- Chimiotactique pour les LT	Macrophages, DC, PNE
CCL3 (MIP-1 $\alpha$ )	- Chimiotactique pour les PNN	Multiplés types cellulaires
CCL4 (MIP-1 $\beta$ )	- Chimiotactique pour les monocytes, macrophages et NK	Monocytes, LB, LT, fibroblastes cellules endothéliales et épithéliales
CXCL9 (MIG)	- Chimiotactique pour les lymphocytes	Non spécifiées
CCL20 (MIP-3 $\alpha$ )	- Chimiotactique pour les lymphocytes	PNN, LB, DC
CXCL5 (LIX)	- Chimiotactique pour les PNN - Régulation des PNN - Remodelage tissus conjonctifs	Cellules épithéliales, PNE
CXCL1 (KC)	- Chimiotactique pour les PNN	Macrophages, PNN, cellules épithéliales
CXCL13 (BLC)	- Chimiotactique pour les LB	LT
CCL22 (MDC)	- Chimiotactique pour les monocytes, DCs, NK et LT activés	DC, macrophages

**Tableau 5** : principales sources et rôles biologiques des chémokines testées dans notre étude.





Après lavage, les échantillons avec les billes, étaient incubés avec les anticorps de détection biotinylés et de la streptavidine couplée au PE pendant 30 minutes. Après 2 lavages avec un tampon spécifique, la quantité d'anticorps de détection liée aux billes était quantifiée à l'aide du cytomètre FORTESSA X20 (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France) réglé pour acquérir 4000 billes par échantillon.

#### **3.4.3.4 Analyse des données**

Le logiciel LEGENDplex v.8.0 était utilisé pour déterminer la concentration des chémokines dans les lysats tissulaires par comparaison avec la courbe étalon. Ces données étaient exportées sur un fichier Excel (Microsoft)

### **3.4.4 Etude cytologique des infiltrats**

#### **3.4.4.1 Isolement des cellules immunitaires de la lèvre et du TG par CMF**

Les cellules de 3 lèvres et 3 TG de chaque côté, prélevés à J6 p.i. après inoculation labiale par SC16 étaient poolées. Pour l'isolement, les cellules étaient marquées 20 minutes avec les anticorps suivant : Live/Dead Aqua (Life Technologies, Invitrogen), PE anti-CD11b, et APC-efluor700 anti-CD45. L'isolement était réalisé avec le cytomètre FACS Aria I (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France) avec le logiciel FACS Diva v6.

#### **3.4.4.2 Centrifugation et étude morphologique**

Les populations isolées étaient centrifugées (Cytospin 4, Thermo Scientific, France). La cytocentrifugeuse était équipée en lames Superfrost Plus (Thermo Scientific, France), chambre et buvard pour chaque échantillon analysé. Un volume de 50µl de chaque suspension était disposée ( $5 \times 10^5$  cellules / ml) dans une chambre, puis centrifugé à 800 RPM pour 1 minute. Les lames étaient séchées puis fixées et colorée par May-Grünwald Giemsa, puis photographiées (Nikon Eclipse 80i avec l'objectif Dxm 1200C) au grossissement X60 et identifiées sur des critères morphologiques par un cytologiste expérimenté.



### 3.4.5 Analyses statistiques :

Les analyses statistiques étaient réalisées avec le logiciel R, version 3.2.0.[243]. Les nombres de cellules étaient comparées à l'aide d'un test de permutation, les concentrations des chémokines étaient comparés à l'aide du t-test, les proportions des infiltrats immunitaires à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Le seuil de significativité était fixé à  $p < 0,05$  (bilatéral).



## 4 Résultats

Il existe chez l'homme, et dans notre modèle OO une protection naturelle des neurones d'un des 2 TG contre le phénomène de réactivation. Nous avons récemment identifié la possibilité d'induire un état de "protection" bilatéral dans notre modèle oro-oculaire. En effet, une primo-infection par inoculation labiale d'une souche non-neurovirulente et non réactivable d'HSV-1 (TK<sub>del</sub>) permet de bloquer les signes d'infection aiguë et de réactivation causés par une souche pleinement virulente inoculée dans la lèvre controlatérale, si celle-ci est inoculé après un délai minimum de 4 jours [244] (**Annexe 1**).

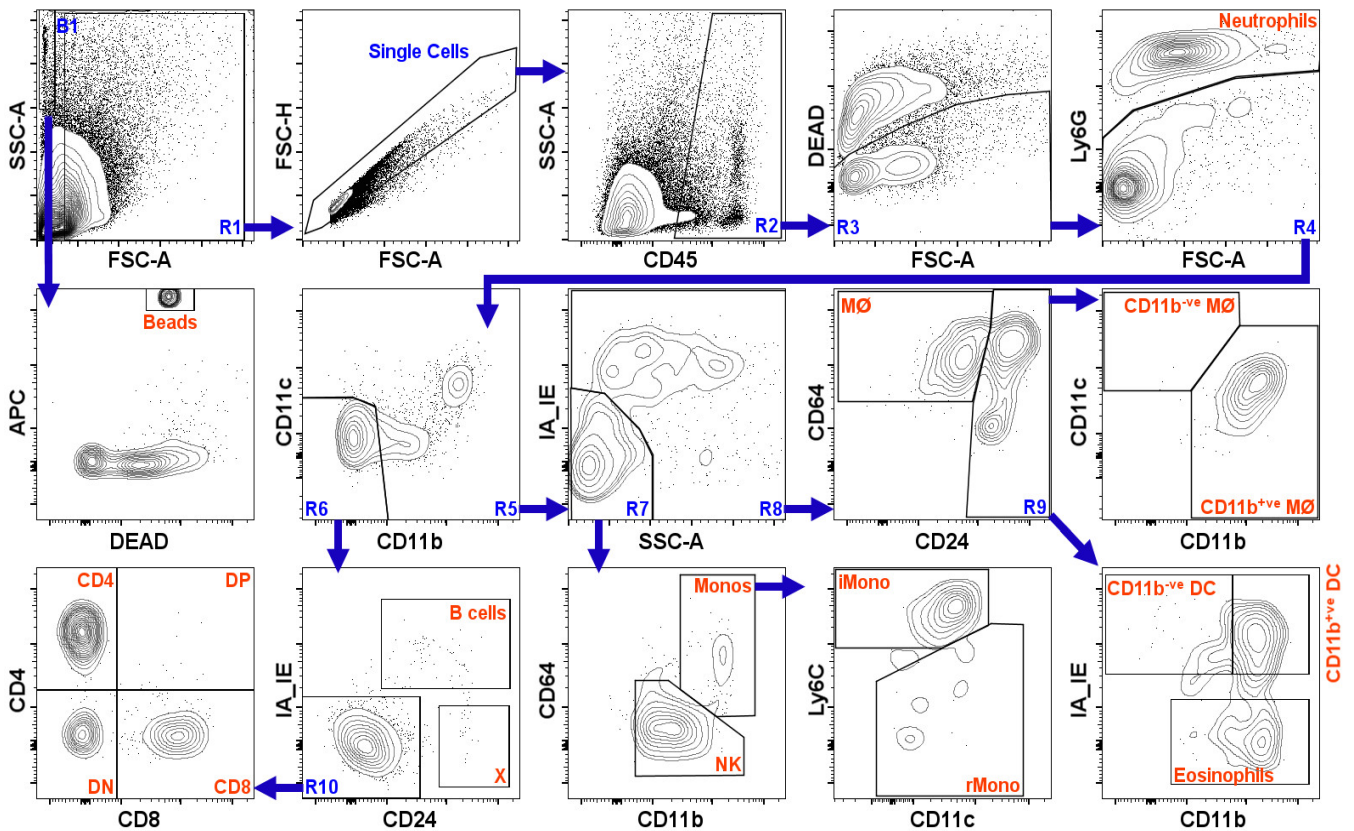
Dans cette étude, nous avons étudié comment l'infection initiale par TK<sub>del</sub> peut modifier la dynamique de l'infiltrat immunitaire et par conséquent des chémokines inflammatoires aux principaux sites de réplication virale, à savoir la lèvre du côté infecté puis les TG [60 116], lors d'une ré-infection par SC16. Dans ces conditions, nous avons précédemment observé que les souris ne présentent aucun des signes habituels de l'infection aiguë (hérissément du pelage, perte de poids, atteinte oculaire du côté de l'inoculation, mortalité) [244], alors qu'on observe une morbidité générale de 100% (dont 60% d'atteinte oculaire) et une mortalité de 35% dans les 10 jours suivant une inoculation simple de la souche SC16 [20 120 244].

### 4.1 Définition des populations en cytométrie en flux (CMF)

La stratégie de définition des populations en CMF utilisé dans notre étude est basée sur le protocole décrit par Yu et al. , conçu et validé pour analyser les infiltrats de cellules immunitaires dans les tissus non-lymphoïdes à l'état inflammatoire [139]. Nous avons cependant modifié quelques aspects du protocole comme suit. Tout d'abord, nous avons éliminé les doublets de cellules. En outre, nous avons utilisé des billes de comptage pour être en mesure de quantifier le nombre absolu de cellules acquises. En outre, les lymphocytes T, définis par CD45<sup>+</sup>/Ly6G<sup>-</sup>/CD11c<sup>-</sup>/CD11b<sup>-</sup>/CD24<sup>-</sup>/MHC2<sup>-</sup> ont été subdivisés en LTCD8<sup>+</sup> et LTCD4<sup>+</sup> (**Figure 22**). Cette stratégie permettait de définir une majorité des sous-types de cellules hématopoïétiques : PNN, PNE, cellules dendritiques CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup>, monocytes totaux, inflammatoires et résidents, LB, LTCD8<sup>+</sup>, LTCD4<sup>+</sup>, LT double négatifs, cellules NK, ainsi qu'une population non déterminée nommée X. Nous



avons donc utilisé cette stratégie de définition pour caractériser l'infiltrat immunitaire dans la lèvre et le TG aux différents temps (tissus non infectés à J0, phase aiguë précoce : J2, J4, J6 ; phase aiguë tardive J10 et phase latente), dans les différents groupes d'études (**Figure 19**).



**Figure 21** : tracés de contour et stratégie de définition des populations immunes dans les lèvres et TG, adapté d'après Yu et al. [139]. Cette permet de définir une majorité des sous-types de cellules hématopoïétiques : PNN, PNE, cellules dendritiques CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup>, monocytes totaux, inflammatoires et résidents, LB, LTCD8<sup>+</sup>, LTCD4<sup>+</sup>, LT double négatifs, cellules NK, ainsi qu'une population non déterminée (X).

## 4.2 Phénomènes immunologiques au site d'inoculation

### 4.2.1 L'infiltrat immunitaire global (cellules CD45<sup>+</sup>) apparaît plus précocement et disparaît plus vite dans les lèvres infectées par SC16 du groupe réinfection

Nous avons tout d'abord quantifié l'infiltrat immunitaire global (cellules hématopoïétiques CD45<sup>+</sup>) aux sites d'injection aux différents temps de l'infection (**lèvres gauches** des groupes contrôles, SC16, réinfection ; et **lèvres droites** du groupe TK<sub>del</sub>) (**Figure 22**).

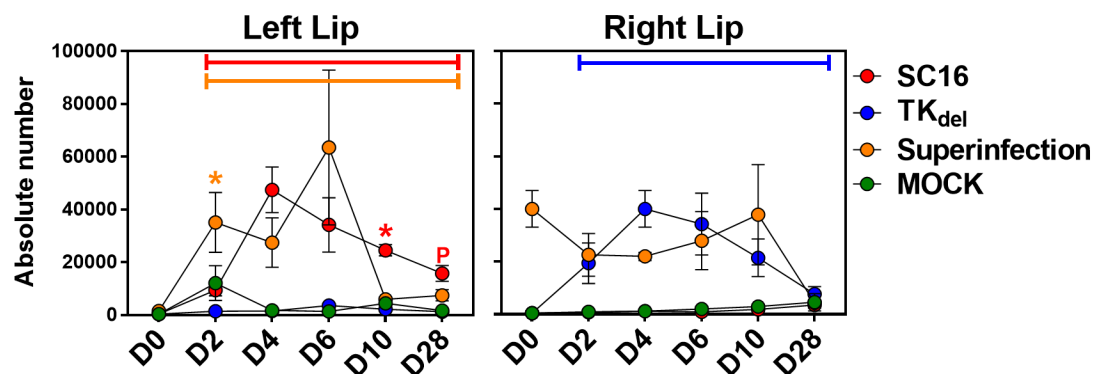
Le nombre de cellules CD45<sup>+</sup> augmentait de manière significative dans tous les groupes à J2 p.i., y compris dans le groupe contrôle. Dans ce dernier, cette augmentation était de faible



intensité et très transitoire, puisqu'elle n'était plus détectée à J4 p.i. Dans les groupes SC16 et TK<sub>del</sub>, le nombre de cellules culminait à J4 p.i., puis diminuait tout en restant à un niveau significatif jusqu'à J28 p.i., surtout dans le groupe SC16, dans lequel le nombre de cellules à J28 était 40 fois plus important qu'à J0.

La cinétique de l'infiltrat immunitaire labial du groupe réinfection était sensiblement différente. Le nombre de cellules CD45<sup>+</sup> à J2 p.i. était significativement supérieur à celui des groupes contrôle, restait à un niveau élevé dans la phase aiguë précoce et s'effondrait à J10 p.i. (temps auquel l'expression des gènes viraux n'est plus détectable en immunohistochimie dans la lèvre [116]).

Ces résultats étaient en faveur d'un recrutement plus rapide dans le site d'infection par SC16 dans le groupe « réinfection » (préalablement inoculé dans la lèvre controlatérale avec TK<sub>del</sub>). En outre, la résolution de l'infiltrat immunitaire semblait plus rapide dans le groupe réinfection que dans les groupes SC16 et TK<sub>del</sub>.



**Figure 22** : évolution de l'infiltrat immunitaire (nombre absolu de cellules CD45<sup>+</sup>) dans la lèvre au cours du temps dans les différents groupes expérimentaux. Les *barres colorées* indiquent la période durant laquelle le nombre de cellules de l'infiltrat est significativement plus élevée qu'à j0, elles ne concernent que les groupes TK<sub>del</sub>, SC16 et réinfection. Les *astérisques colorés* indiquent que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de l'astérisque est significativement plus important que ceux des autres groupes. La *lettre P colorée* indique que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de la lettre est significativement plus important que ceux du groupe contrôle (PBS). (Superinfection = réinfection)



#### 4.2.2 L'infection préalable par TK<sub>del</sub> induit des modifications qualitatives, quantitatives et dynamiques des sous-types immunitaires au site de la réinfection par SC16

A l'aide de la stratégie de définition des populations définies précédemment (**Figure 21**), nous avons analysé plus spécifiquement les différentes sous-populations de cellules immunitaires de l'infiltrat dans les lèvres de animaux inoculés, afin de déterminer si la dynamique de ces infiltrats dans le tissu labial réinfecté par SC16 était modifiée par l'inoculation préalable du virus TK<sub>del</sub> dans la lèvre controlatérale (**Figure 23**).

L'ensemble des populations étudiées infiltrait les tissus labiaux infectés de manière significative dès J2, à l'exception des LB et des DC CD11b<sup>+</sup> (**Figure 23 I & K**).

**Dans les lèvres inoculées avec du PBS** (groupe contrôle), on constatait également des infiltrats significatifs, qui ne concernaient toutefois que les monocytes inflammatoires, les macrophages, les PNN, les PNE, les DC CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup>, et disparaissaient à J4 (**Figure 23 E-J, courbe verte**). Au contraire, les infiltrats de ces populations persistaient à jusqu'à J28 dans les lèvres infectées des groupes SC16 and TK<sub>del</sub>.

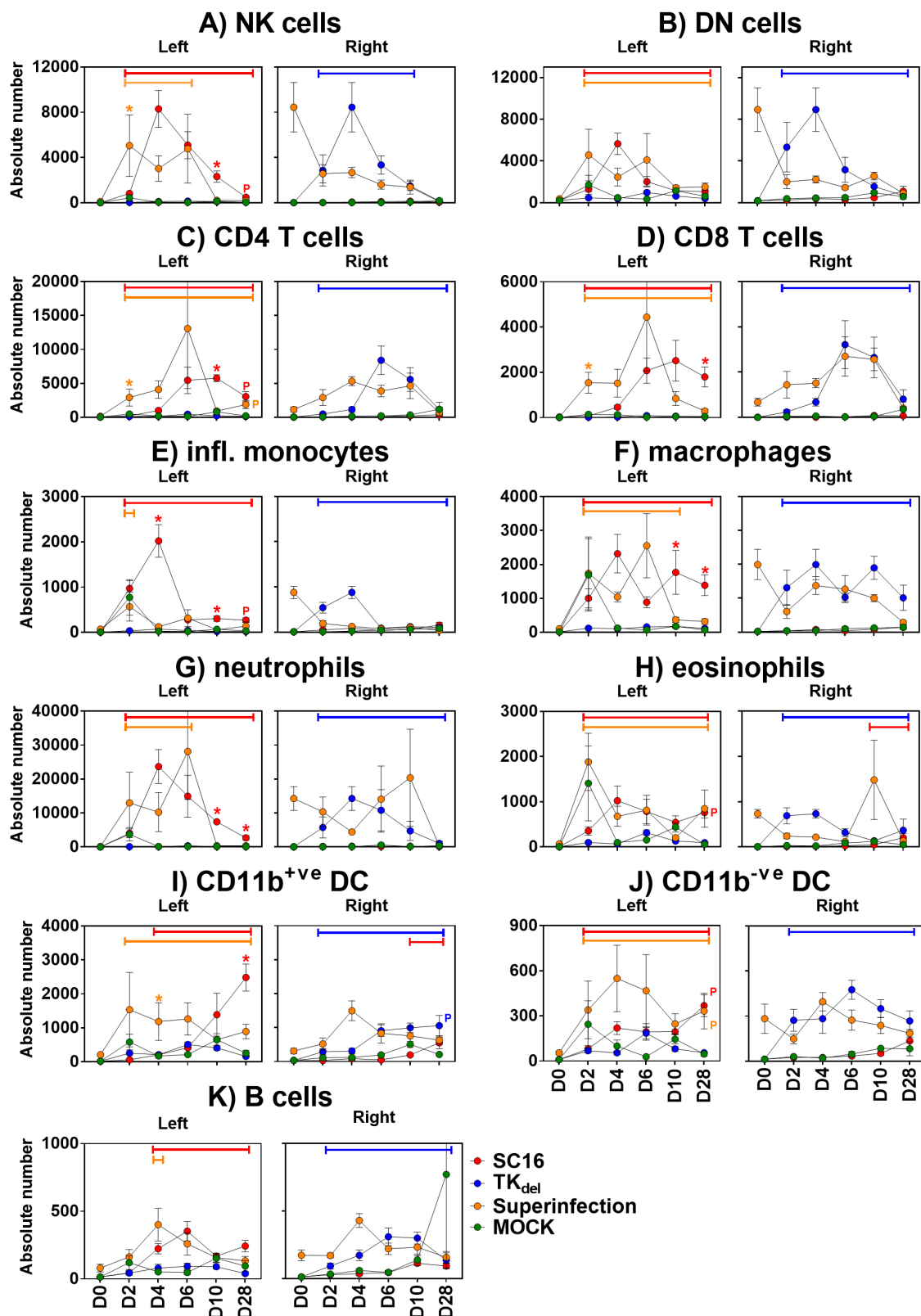
**Dans les lèvres infectées du groupe SC16** la plupart des sous-types culminaient à J4 (NK, LT DN, monocytes inflammatoires, macrophages, PNN et PNE (**Figure 23 A, B, E-H**). Ces infiltrats déclinaient à partir de J6 mais persistaient à des niveaux significatifs jusqu'à J28, à l'exception des LT DN. Les LT CD4<sup>+</sup> et CD8<sup>+</sup> et les LB culminaient à J6 et persistaient également jusqu'à J28 (**Figure 23 C, D & K**). Le nombre de DC CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup> semblaient augmenter au cours du temps, atteignant un maximum à J28 (**Figure 23 I & J**)

L'infiltrat des **lèvres infectées par SC16 du groupe réinfection** était très différent de celui du groupe SC16, tant sur sa composition que sur sa dynamique. Les NK, LT CD4<sup>+</sup> et CD8<sup>+</sup>, y augmentaient de manière plus importante J2. Par contre, ils diminuaient drastiquement après J6. Les macrophages et les neutrophiles diminuaient également après J6 (**Figure 23 F & G**). En outre, il ne semblait pas y avoir d'infiltration par des monocytes inflammatoires (**Figure 23 E**). Enfin, les DC CD11b<sup>+</sup> atteignaient des nombres plus importants, bien qu'ils n'étaient supérieurs à ceux des groupes contrôles et SC16 seulement à J4, et ils restaient à un niveau équivalent jusqu'à J28.



Pour résumer, suite à une infection par HSV-1, la plupart des populations immunes infiltraient la lèvre inoculée à J2, culminaient à J4-J6 et persistaient à J28. Une primo-infection par TK<sub>del</sub> entraîne donc des modifications majeures de la composition et de la dynamique de l'infiltrat immunitaire lors d'une réinfection par SC16 4 jours plus tard dans la lèvre controlatérale : infiltration plus précoce et plus abondante par les NK, les LTCD4<sup>+</sup> et les LTCD8<sup>+</sup>, absence de monocytes inflammatoires pendant la phase aiguë, augmentation des DC et réduction des infiltrats immunitaires à la phase aiguë tardive (J10) et à la phase de latence (J28).





**Figure 23 A-K** : évolution au cours du temps de l'infiltrat pour chacune des sous-populations de cellules immunitaires dans la lèvre pendant l'infection. Les *barres colorées* indiquent la période durant laquelle le nombre de cellules de l'infiltrat est significativement plus élevée qu'à J0, elles ne concernent que les groupes TK<sub>del</sub>, SC16 et réinfection (*Superinfection*). Les *astérisques colorés* indiquent que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de l'astérisque est significativement plus important que ceux des autres groupes. La *lettre P colorée* indique que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de la lettre est significativement plus important que ceux du groupe contrôle (*Mock*).





### 4.2.3 L'infiltrat immunitaire dans les lèvres réinfectées est orienté vers une réponse adaptative

Afin d'affiner l'analyse des modifications des dynamiques de l'infiltrat immunitaire du site de surinfection par SC16 induite par primo-infection préalable par TK<sub>del</sub>, nous avons comparé les proportions des différents infiltrats spécifiques (% du nombre total de cellules CD45<sup>+</sup>), présentes au site d'inoculation de SC16 dans les groupes **SC16** et **réinfection**. Dans un souci de clarté, les populations de LTCD4<sup>+</sup> et LTCD8<sup>+</sup> étaient fusionnées, de même que les populations de DC CD11<sup>+</sup> et CD11<sup>-</sup> (Figure 24).

Les PNN constituaient la sous-population majoritaire dans les lèvres inoculées des groupes SC16 et réinfection entre J2 et J6 (Figure 24, orange). Toutefois, la proportion des PNN diminuait à J10 et J28 dans le groupe réinfection, tandis qu'elle restait prédominante dans le groupe SC16 (8% vs 32% à J10 ; 5% vs 18% à J28, respectivement,  $p < 0,03$ ).

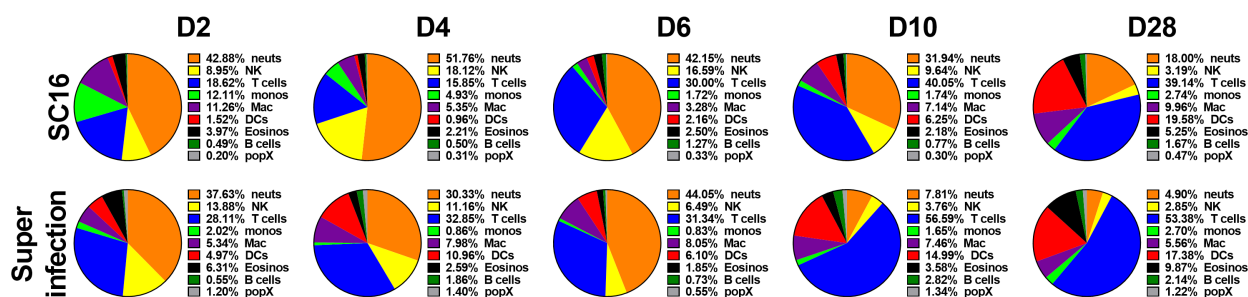
Dans les lèvres réinfectées par SC16, les monocytes étaient nettement moins fréquents à J2 et J4 (2% vs 12% à J2 ; 1% vs 5% à J4 ; respectivement,  $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons), mais cette différence n'était plus significative à J6 et J10. En outre, la proportion de NK était moindre de J4 à J10 (11% vs 18% à J4, 6% vs 17% à J6, 4% vs 10% at D10, respectivement,  $p < 0,03$  pour les 3 comparaisons).

A l'opposé, la proportion de LT était plus importante dans les lèvres du groupe réinfection à J4 et J10 (33% vs 16% à J4 ; 57% vs 40% à J10 ; respectivement,  $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons). De même, les LB et les DC étaient plus fréquents à J4 et J10 dans le groupe réinfection (LB : 2% vs 0,5% à J4 ; 3% vs 0,8% à J10 respectivement ;  $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons ; DC : 11% vs 1% à J4; 15% vs 6% à J10,  $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons).

A la phase de latence (J28), les proportions de DC étaient comparables dans les 2 groupes, tandis que la proportion des LT était plus importante dans le groupe réinfection (53% vs 39% ;  $p < 0,03$ ).

L'ensemble de ces résultats était en faveur d'une transition d'une réponse innée lors de la primo-infection par SC16 vers une réponse adaptative lors d'une réinfection par SC16 effectuée 4 jours après une primo-infection par TK<sub>del</sub>.





**Figure 24** : représentation en diagramme des proportions des différentes populations de l'infiltrat immunitaire total (CD45<sup>+</sup>) pendant la phase aiguë et latente de l'infection dans les lèvres infectées ou surinfectées par SC16 (lèvres gauches des groupes SC16 et réinfection). Les proportions de chaque type cellulaire ont fait l'objet d'une comparaison statistique (test de Kruskal-Wallis) entre les groupes SC16 et réinfection.

#### 4.2.4 Les concentrations de chémokines inflammatoires sont diminuées

##### lors d'une réinfection par SC16

Afin de mieux caractériser la réponse inflammatoire induite au site de l'inoculation d'HSV1, nous avons mesuré les concentrations en chémokines inflammatoires dans les lèvres inoculées des groupes TKdel, SC16 et réinfection (**Figure 25**).

Les dynamiques des concentrations en chémokines inflammatoires aux sites d'inoculation étaient globalement similaires dans **les groupes TK<sub>del</sub> et SC16** (**Figure 25 A et B**, respectivement), avec un pic de concentration à J4 p.i. suivi d'une diminution à J6 p.i. (à l'exception de CCL11 dont le pic était à J6 p.i. dans le groupe SC16).

**Dans les lèvres inoculées du groupe TK<sub>del</sub>** les concentrations de CCL11, CCL2, CCL3 et CCL4 augmentaient uniquement à J4 p.i. (**Figure 25 A**). En revanche, l'augmentation des concentrations de CCL5, CXCL9 et CXCL10 était significative pendant toute la phase aiguë (J2 à J10 p.i.).

**Dans les lèvres inoculées du groupe SC16**, les concentrations en CCL2, CCL3, CCL4, CCL11, CXCL1, CXCL9, et CXCL10 étaient significativement augmentées pendant toute la phase aiguë (J2 à J10 p.i., **Figure 25B**). CCL2 persistait en latence (J28 p.i.) à des niveaux bas, mais significatifs, par rapport aux concentrations observées dans les tissus naïfs (J0). Les concentrations de CXCL13 augmentaient de J4 à J28 p.i., mais, en raison d'une variabilité importante des mesures, seules les concentrations à J6 et J10 p.i. étaient significativement supérieures à celles de J0. Les



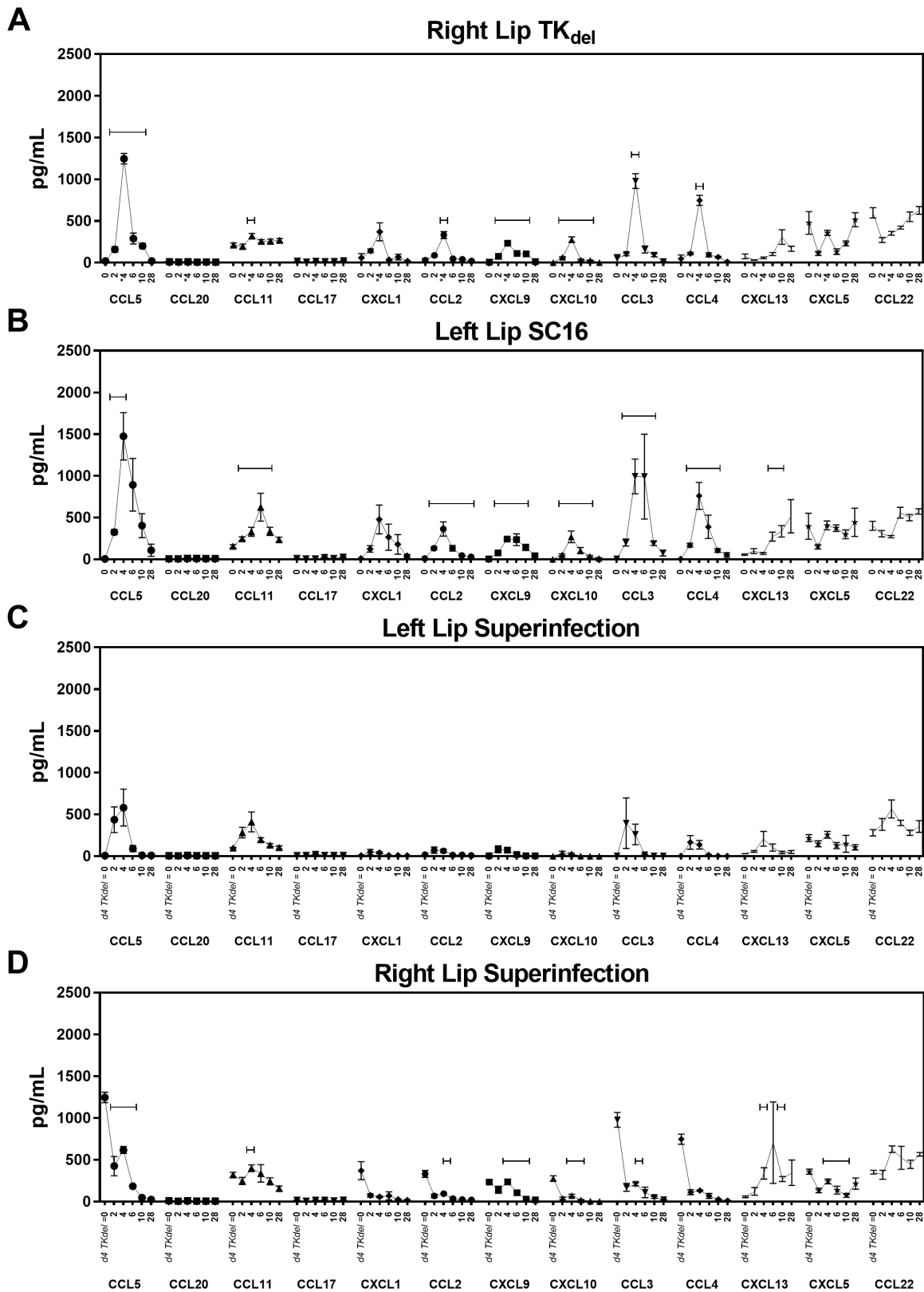
concentrations en CCL5 étaient augmentées durant toute l'étude, mais pour la même raison, cette augmentation n'était significative qu'à J2 et J4 p.i.

**Dans les lèvres inoculées par SC16 du groupe réinfection**, il semblait y avoir une augmentation des concentrations de CCL5, CCL11, CCL3, CCL4, et CXCL13, toutefois non significative en comparaison avec J0 (**Figure 25C**)

Comme attendu, on retrouvait dans **les lèvres inoculées par TK<sub>del</sub> du groupe ré-infection** (lèvres droites) un profil d'augmentation des concentrations de chémokines comparable à celui observé dans les tissus labiaux infectés du groupe TK<sub>del</sub>. On notait en effet une augmentation significative de CCL5, CCL11, CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3, CXCL13 et CXCL5 (**Figure 25D**), mais de façon sporadique entre J2 et J10 après la réinfection par SC16, ce qui correspond à J6-J14 après l'infection par TK<sub>del</sub>.

Nous observions donc une augmentation majeure et une persistance des chémokines inflammatoires dans les lèvres inoculées du groupe SC16, contrairement à celles du groupe TK<sub>del</sub>. Par ailleurs, on observait une nette diminution des chémokines inflammatoires dans le site d'inoculation de SC16, lorsque les animaux avaient été préalablement inoculés avec TK<sub>del</sub> (groupe réinfection).





**Figure 25 : Dynamique des concentrations des chémokines inflammatoires dans la lèvre (pg/mL) au cours de l'étude (J0, J2, J4, J6, J10, J28). A) Lèvre inoculée (droite) du groupe TK<sub>del</sub> ; B) Lèvre inoculée (gauche) du groupe SC16 ; C) lèvre inoculée par SC16 (gauche) du groupe réinfection ; D) Lèvre inoculée par TK<sub>del</sub> (droite) du groupe réinfection.**



## 4.3 Phénomènes immunologiques dans le TG

### 4.3.1 L'infiltrat immunitaire est diminué du côté de la réinfection par SC16

A l'aide de la même méthodologie que celle utilisée pour les lèvres infectées, nous avons ensuite évalué la dynamique de l'infiltrat immunitaire global (nombre de cellules CD45<sup>+</sup>) dans les TG des souris des différents groupes (**Figure 26**).

Dans le groupe **contrôle (Figure 26, TG gauches, courbe verte)**, nous n'observons pas d'infiltrat significatif aux différents temps de l'infection.

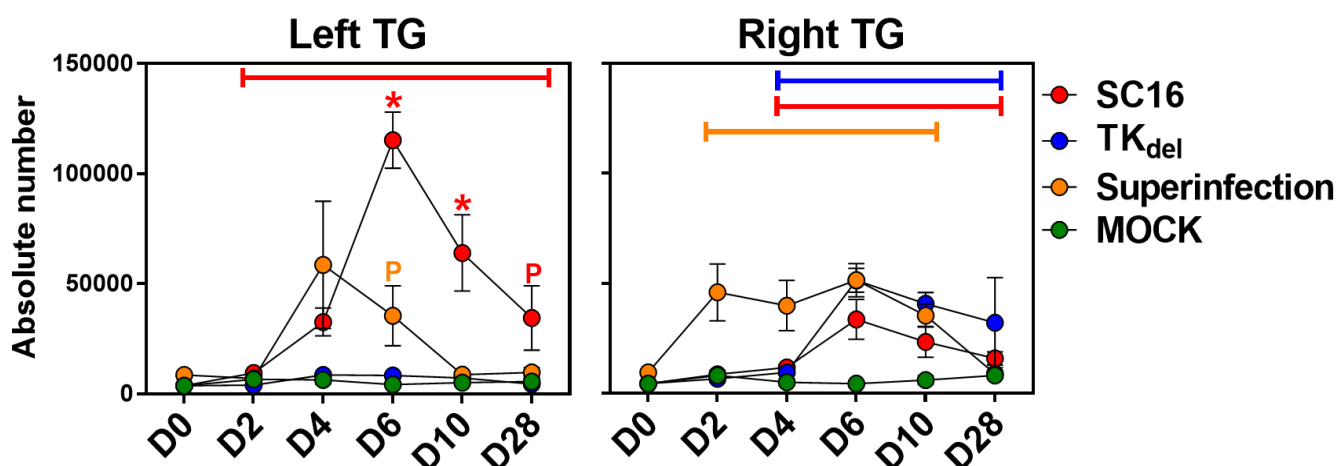
Dans le TG ipsilatéral à l'inoculation (iTG) du **groupe SC16**, il existait une augmentation minime, mais significative, de l'infiltrat dès J2. Le nombre de cellules CD45<sup>+</sup> était multiplié par 8,7 à J4 et atteignait son pic à J6, où le nombre de cellules était multiplié par 32 par rapport à J0 (**Figure 26, TG gauches, courbe rouge**). L'infiltrat diminuait à J10, tout en restant plus important que dans les iTG des autres groupes ( $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons). A J28, l'infiltrat restait supérieur à celui du groupe contrôle. Dans le TG controlatéral à l'inoculation, on notait un infiltrat significatif, mais de moindre abondance, de J4 à J28 (**Figure 26, TG droites, courbe rouge**).

La cinétique de l'infiltrat des iTG du **groupe TK<sub>del</sub>**, était globalement comparable, mais avec 2 différences notables : un début retardé de 2 jours (J4 à la place de J2) et un nombre de cellules nettement moindre.

Concernant le **groupe réinfection**, il y avait une augmentation de l'infiltrat CD45<sup>+</sup> dans certains TG ipsilatéraux à la réinfection par SC16 (gauches), mais en moyenne, cette variation n'était pas significative, en comparaison avec l'infiltrat à J0 (**Figure 26, TG gauches, courbe orange**). Par contre, l'infiltrat était significativement plus important que dans le groupe contrôle ( $p < 0,03$ ) à J6, puis revenait à un niveau équivalent à ce dernier à J10 et J28. De manière attendue, l'infiltrat dans le TG droit du groupe réinfection (du côté de l'inoculation de TK<sub>del</sub>) était similaire à celui du iTG du groupe TK<sub>del</sub>, sachant que J2 dans ce groupe correspond à J6 après l'inoculation de TK<sub>del</sub> (**Figure 26, TG droites, courbe orange**).

Ces données démontraient une infiltration significative des iTG du groupe SC16 à J2, qui persistait en abondance jusqu'à J28 (phase de latence). L'infiltrat était nettement moindre dans le TG ipsilatéral à l'inoculation de SC16 du groupe réinfection, où il était résolu à J10.





**Figure 26** : évolution de l'infiltrat immunitaire (nombre absolu de cellules CD45<sup>+</sup>) dans les TG au cours du temps dans les différents groupes expérimentaux. Les *barres colorées* indiquent la période durant laquelle le nombre de cellules de l'infiltrat est significativement plus élevée qu'à j0, elles ne concernent que les groupes TK<sub>del</sub>, SC16 et réinfection. Les *astérisques colorés* indiquent que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de l'astérisque est significativement plus important que ceux des autres groupes. La *lettre P colorée* indique que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de la lettre est significativement plus important que ceux du groupe contrôle (PBS). (Superinfection = ré-infection, Mock = contrôle).

#### 4.3.2 Certaines types cellulaires sont absents des TG ipsilatéraux à la ré-infection par SC16

L'analyse spécifique des différentes populations de cellules immunitaires permettait de mieux cerner l'effet d'une primo-infection par TK<sub>del</sub> lors de la réinfection par SC16 (**Figure 27**).

Dans les iTG du groupe SC16, on constatait une augmentation significative de l'ensemble des sous-populations pendant la phase aiguë de l'infection (J2-J10). Le nombre de cellules culminait à J4 pour les monocytes inflammatoires et les PNN (**Figure 27 E & G**), et à J6 pour les autres populations (cellules NK, cellules DN, LTCD4<sup>+</sup>, LTCD8<sup>+</sup>, macrophages, PNE, DC CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup> et LB, **Figure 27 A-D, F, H-K**). Les monocytes inflammatoires et les PNE persistaient jusqu'à la fin de la phase aiguë (J10) (**Figure 27 E & H**), alors que les PNN diminuaient à J6 (**Figure 27 G**). Les autres populations persistaient jusqu'à J28 (**Figure 27 A-D, F, I-K**), à des niveaux le plus souvent supérieurs à ceux du groupe contrôle (**Figure 27 C, D, F, I and J**).

On observait dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub>, une dynamique assez similaire, mais avec une amplitude moindre, à l'exception des infiltrats des LTCD4<sup>+</sup>, LTCD8<sup>+</sup> et DC CD11b<sup>-</sup> dont l'amplitude était comparable à celle des iTG du groupe SC16.

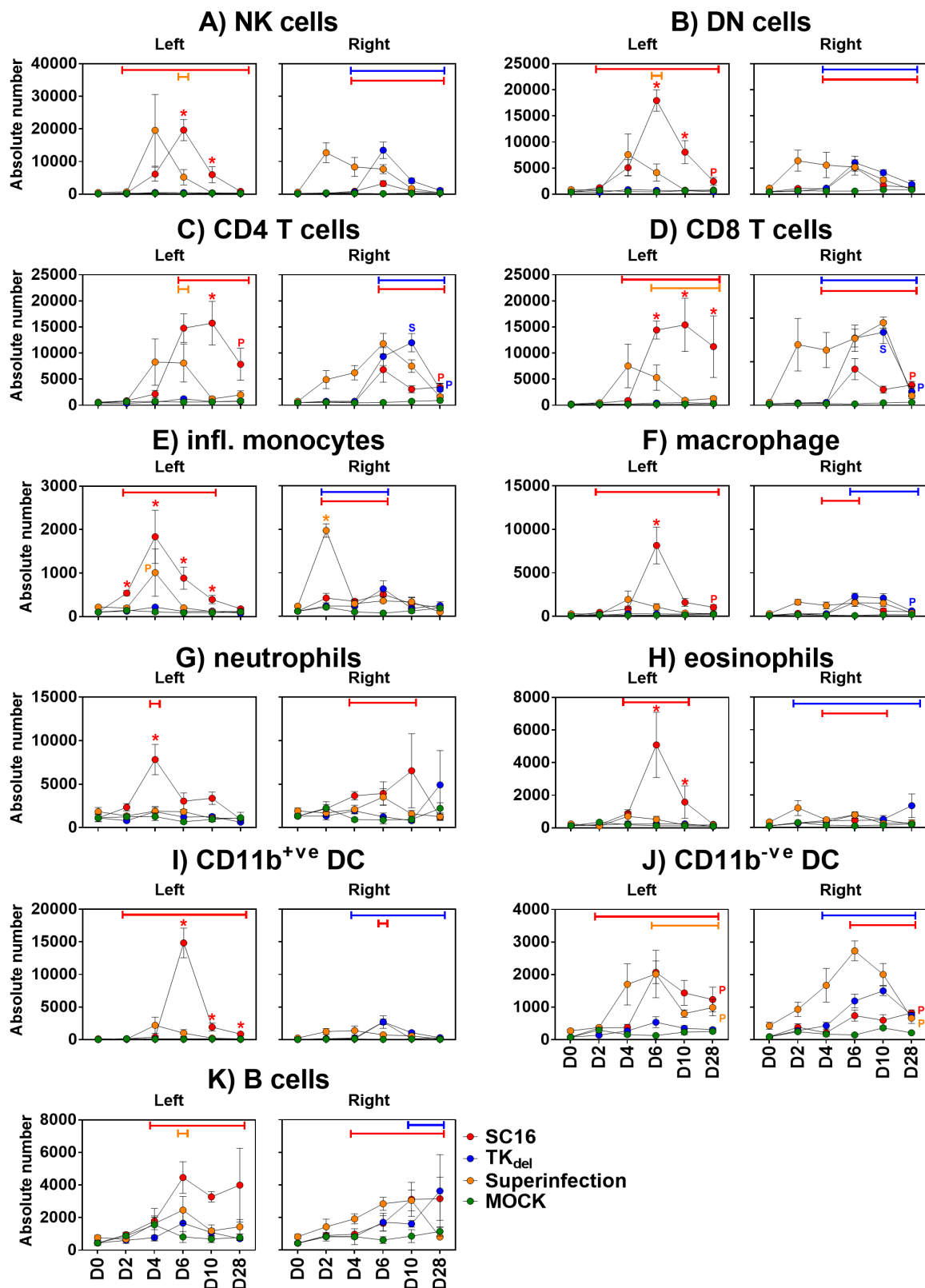


Dans les **TG controlatéraux à l'inoculation du groupe SC16 (Figure 27, TG droits, courbe rouge)** on détectait une augmentation significative, mais limitée à la phase aiguë, des monocytes inflammatoires, macrophages, PNN, PNE et DC CD11b<sup>+</sup> (**Figure 27 E-I**). En revanche, les NK, cellules DN, LTCD4<sup>+</sup>, LTCD8<sup>+</sup>, DC CD11b<sup>-</sup> et les LB augmentaient à la fois pendant la phase aiguë et en latence (**Figure 27 A-D, J, K**).

Dans le groupe **réinfection**, il y avait une réduction globale des infiltrats spécifiques dans les TG ipsilatéraux à la réinfection par SC16. Les nombres de NK, DN, LTCD4<sup>+</sup>, monocytes inflammatoires et LB (**Figure 27 A-C, K**) n'augmentaient de manière significative qu'à un seul temps de l'infection (*J4 pour les monocytes inflammatoires, J6 pour les autres*). Les LTCD8<sup>+</sup> persistaient jusqu'à J28 (**Figure 27 D**), mais à un niveau moindre que dans les iTG du groupe SC16. Il semblait y avoir une augmentation des DC CD11b<sup>-</sup> dès J4, mais cette dernière ne devenait significative qu'entre J6 et J28 (**Figure 27 J**), et à niveau équivalent à celui constaté dans le groupe SC16. En revanche, il n'y avait pas d'augmentation significative des macrophages, PNN, PNE, DC CD11b<sup>+</sup> (**Figure 27 F-I**).

On constatait donc une infiltration très nette par l'ensemble des populations dans les iTG du groupe SC16, avec certaines populations présentes dès J2 (NK, cellules DN, monocytes inflammatoires), mais surtout, une augmentation nette à J4 ou J6. Dans le TG controlatéral, il y avait un infiltrat très discret des populations de l'immunité innée et un infiltrat réduit, mais plus sensible des populations de l'immunité adaptative. Ce même type de profil était retrouvé dans les TG ipsilatéraux à l'inoculation de SC16 du groupe **ré-infection**, avec une réduction majeure, voire une disparition, de certaines populations de l'immunité innée (macrophages, PNE, PNN, DC CD11b<sup>+</sup>) et une réduction des populations de l'immunité adaptative.





**Figure 27 A-K:** évolution au cours du temps de l'infiltrat pour chacune des sous-populations de cellules immunitaires dans les TG pendant l'infection. Les *barres colorées* indiquent la période durant laquelle le nombre de cellules de l'infiltrat est significativement plus élevée qu'à J0, elles ne concernent que les groupes TK<sub>del</sub>, SC16 et réinfection (*Superinfection*). Les *astérisques colorés* indiquent que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de l'astérisque est significativement plus important que ceux des autres groupes. La *lettre P colorée* indique que l'infiltrat CD45<sup>+</sup> du groupe correspondant à la couleur de la lettre est significativement plus important que ceux du groupe contrôle (*Mock*).





### 4.3.3 Les lymphocytes T prédominent dans les TG, avec une cinétique différente lors de la réinfection par SC16

Afin de mieux comprendre comment la primo-infection préalable par TK<sub>del</sub> modifiait les dynamiques de l'infiltrat immunitaire des TG ipsilatéraux à l'inoculation de SC16, nous avons comparé les proportions des différents infiltrats spécifiques (% du nombre total de cellules CD45<sup>+</sup>), présentes au site d'inoculation de SC16 dans les groupes **SC16** et **réinfection (Figure 28)**.

Les LT constituaient l'infiltrat prédominant dans les 2 groupes. Dans les iTG du groupe SC16, la proportion de ces derniers augmentait au cours de la phase aiguë, de 28% à J4, à 63% à J10, puis se stabilisait à J28 (65%). Leur fréquence évoluait moins dans le groupe réinfection, passant de 34% à J2, à 36% à J10 puis 42% à J28. Toutefois, la différence de proportion des LT entre les 2 groupes n'était significative qu'à J10 ( $p < 0,03$ ).

Au premier temps de mesure (J2), les proportions des populations étaient assez similaires entre les 2 groupes, à l'exception des monocytes, plus fréquents dans les iTG du groupe SC16 (12% vs 7% ;  $p < 0,03$ ). La proportion de ces derniers restait plus importante dans le groupe SC16 à J4 (8% vs 3% ;  $p < 0,03$ ), tandis que la tendance s'inversait à J10 et J28 où ils étaient plus fréquents dans le groupe réinfection (5% vs 1% à J10 ; 4% vs 1% à J28 ;  $p < 0,03$  pour les 2 comparaisons).

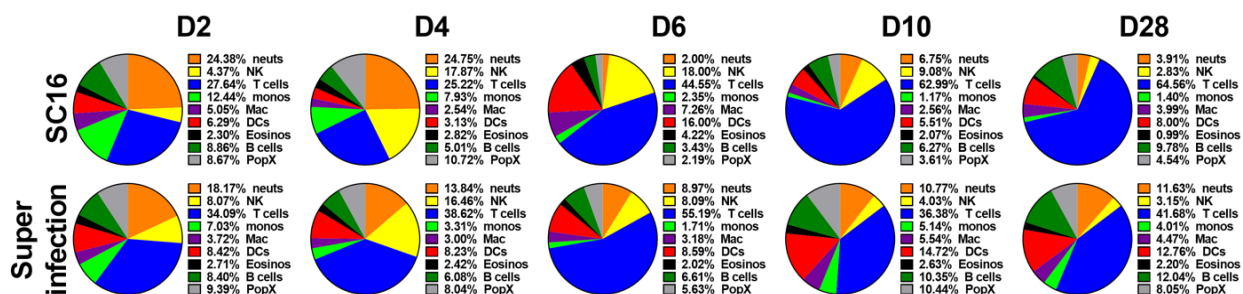
Dans les TG du groupe SC16, la proportion des DC culminait à J6, où elle était supérieure à celle du groupe réinfection (16% vs 9%  $p < 0,03$ ), puis diminuait à J10, où à l'inverse, elle était inférieure à celle du groupe réinfection (6% vs 15% ;  $p < 0,03$ ).

Dans les iTG du groupe SC16, la proportion des NK, monocytes, macrophages et PNE déclinait au cours du suivi, au profit de l'augmentation des LT et des PNN. Dans les TG du groupe réinfection, les LT étaient plutôt stables et les NK diminuaient alors que les autres populations augmentaient.

Ces résultats illustraient les cinétiques différentielles des proportions des monocytes, des DC, des NK et des LT au cours de la phase aiguë (J2 à J10). Les LT qui prédominaient largement dans les 2 groupes, voyaient leur proportion augmenter au fil du temps dans le groupe SC16, tandis qu'elle était plutôt stable dans le groupe réinfection. Aux premiers jours de la phase aiguë, les monocytes étaient plus fréquents dans les iTG du groupe SC16 que dans le groupe réinfection,



tandis que c'était le contraire à J10 et J28. Quant aux DC, leur proportion atteignait un pic à J6 suivi d'une diminution dans le groupe SC16, alors qu'elle augmentait plus tardivement (J10) et se stabilisait dans la phase de latence dans le groupe réinfection.



**Figure 28** : représentation en diagramme des proportions des différentes populations de l'infiltrat immunitaire total (CD45<sup>+</sup>) pendant la phase aiguë et latente de l'infection dans les TG ipsilatéraux à l'inoculation de SC16 (gauches) dans les groupes SC16 et réinfection. Les proportions de chaque type cellulaire ont fait l'objet d'une comparaison statistique (test de Kruskal-Wallis) entre les groupes SC16 et réinfection.

#### 4.3.4 Les chémokines inflammatoires induites par l'infection des TG par SC16

##### sont nettement diminuées lors de la réinfection

Afin de mieux définir la réaction inflammatoire induite par l'infection par HSV-1 dans les TG, nous mesurons et comparons les concentrations des chémokines inflammatoires dans les iTG des groupes SC16 et TK<sub>del</sub>, et dans les TG ipsilatéraux à l'inoculation de SC16 du groupe réinfection (**Figure 29**).

Dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub>, les concentrations de CCL5, CCL11, CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3, CCL4, CXCL13, et CCL22, atteignaient leur pic à J6 (**Figure 29 A**).

Dans les iTG du groupe SC16 ces mêmes chémokines étaient détectées, ainsi que CXCL1 et CXCL5, mais à des concentrations supérieures (**Figure 29 B**). Fait notable, les concentrations de CXCL1, CCL2, CCL3, CCL4, CXCL9 et CXCL10 atteignaient leur pic à J4 dans les iTG du groupe SC16, soit 2 jours plus tôt que dans ceux du groupe TK<sub>del</sub> (J6).

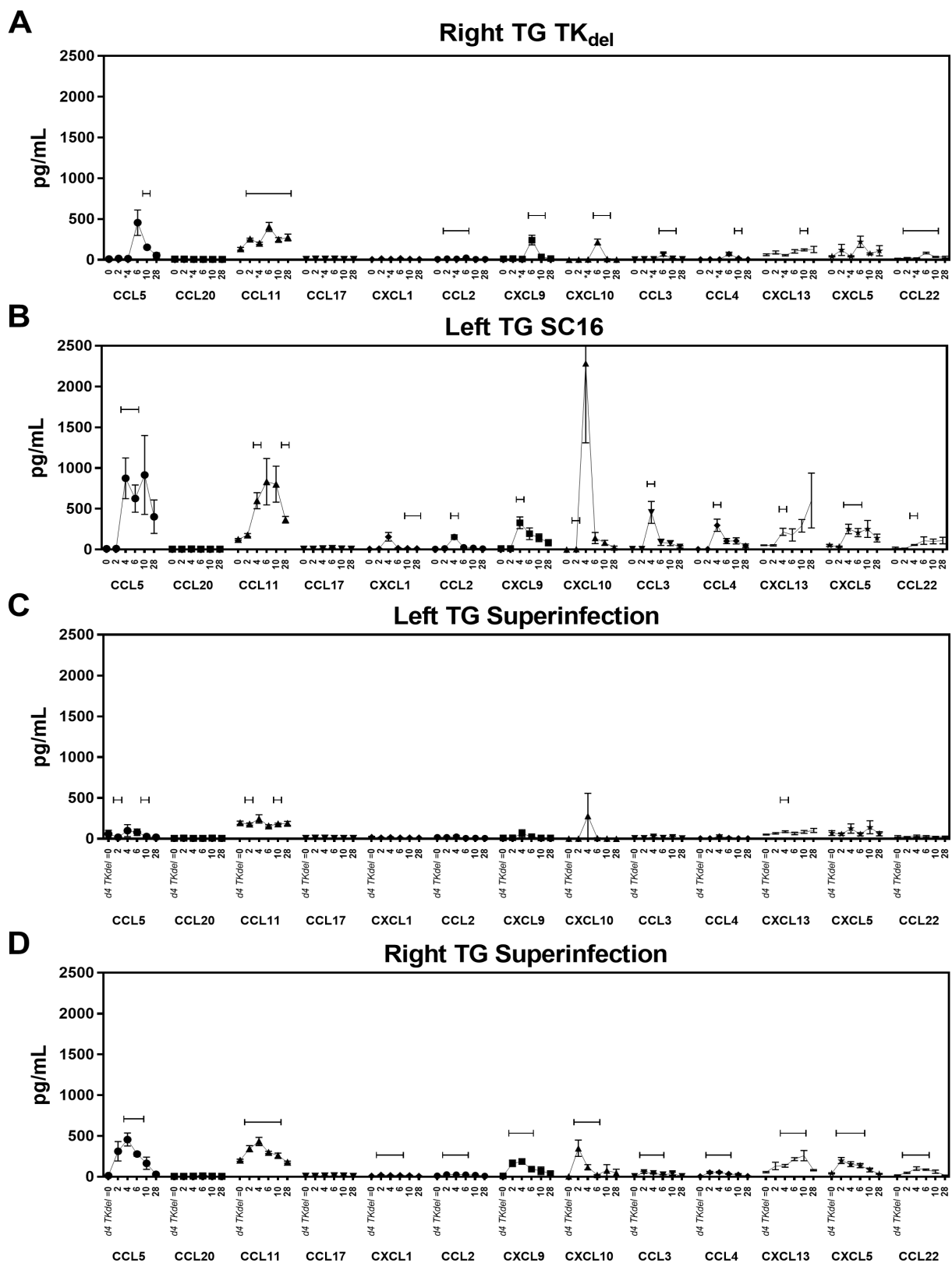
Dans les TG ipsilatéraux de la réinfection par SC16 seules les concentrations de CCL5, CCL11 et CXCL13 augmentaient de manière significative (**Figure 29 C**). Dans ce groupe, on retrouvait par contre une augmentation significative de nombreuses chémokines (CCL5, CCL11, CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3, CXCL13, CXCL5) dans les TG droits, ipsilatéraux à l'infection par TK<sub>del</sub> (**Figure 30D**). Ces chémokines étaient détectées à partir de J2 de l'infection par SC16, qui



correspond en réalité à J6 après l'infection par TK<sub>del</sub>, reproduisant une cinétique comparable à celle constatée dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub>.

Ces données nous permettent de mieux cerner les réponses inflammatoires secondaires aux différents protocoles d'infection par HSV-1 dans les TG : nous constatons d'une part un délai pour atteindre le pic de concentration de chémokines inflammatoires dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub>, et d'autre part, des niveaux plus élevés de chémokines dans les iTG du groupe SC16. De façon marquante, les chémokines inflammatoires étaient quasiment absentes des TG ipsilatéraux à la réinfection par SC16.





**Figure 29 : Dynamique des concentrations des chémokines inflammatoires dans les TG (pg/mL) au cours de l'étude (J0, J2, J4, J6, J10, J28). A) TG ipsilatéral à l'inoculation (droit) du groupe TK<sub>del</sub> ; B) TG ipsilatéral à l'inoculation (gauche) du groupe SC16 ; C) TG ipsilatéral à la réinfection (gauche) du groupe SC16 D) TG ipsilatéral à l'inoculation par TK<sub>del</sub> (droit) du groupe réinfection.**



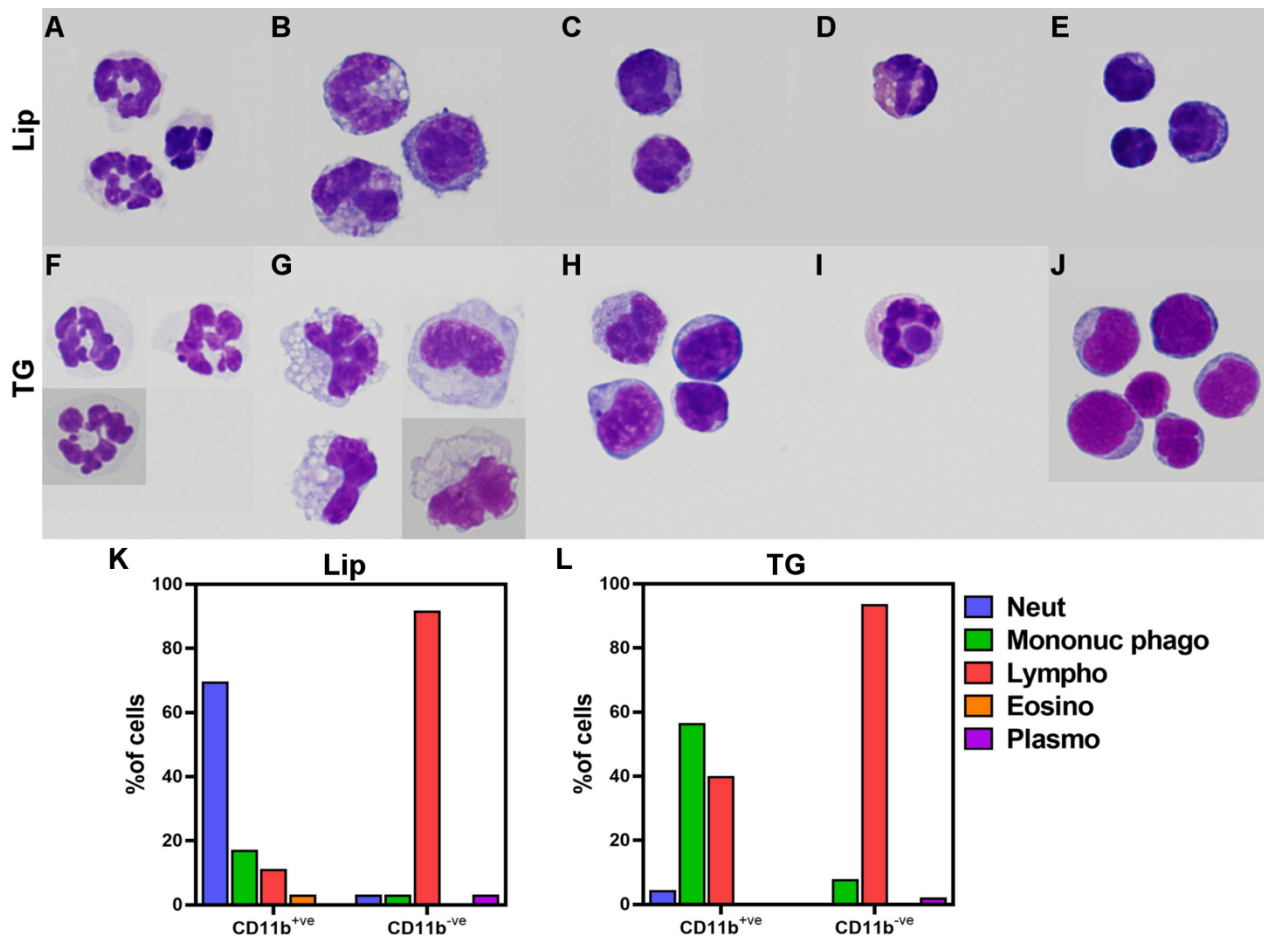
#### 4.4 Comparaison en cytologie des infiltrats dans la lèvre et le TG

Afin de confirmer les résultats d'analyse des sous-types cellulaires obtenus en CMF, nous avons isolé, coloré, compté et analysé les cellules hématopoïétiques CD11b<sup>+</sup> ou CD11b<sup>-</sup> (PNN, PNE, phagocytes mononucléés, lymphocytes, plasmocytes) dans la lèvre et le TG, à J6 après une infection par SC16.

Avec cette méthodologie, permettant de concentrer les populations les plus rares sur les lames, les cellules CD11b<sup>+</sup> de la lèvre étaient pour la grande majorité des PNN (69%) (**Figure 30 K**), suivis par les cellules phagocytaires mononucléés (17%), les lymphocytes (11%) et les PNE (3%). Dans le TG, les phagocytes mononucléés et les lymphocytes (56% et 40%, respectivement) constituaient la grande majorité des cellules hématopoïétiques CD11b<sup>+</sup> (**Figure 30 L**). Les cellules hématopoïétiques CD11b<sup>-</sup> étaient majoritairement composées de cellules lymphocytaires, aussi bien dans la lèvre que dans le TG (91% et 93%, respectivement).

Ces données retrouvaient les mêmes tendances que celles mesurées en CMF, et confirmaient les différences majeures de composition entre les infiltrats immunitaires des lèvres et des TG.





**Figure 30 : Partie supérieure :** exemples de cellules CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup> observées dans des suspensions de lèvre et de ganglion trigéminal (TG) à J6 d'une inoculation labiale par la souche SC16 d'HSV-1. **A)** Polynucléaires neutrophiles (PNN) CD11b<sup>+</sup> de la lèvre, **B)** Cellules phagocytaires mononucléées CD11b<sup>+</sup> de la lèvre, **C)** Lymphocytes CD11b<sup>+ve</sup> de la lèvre, **D)** Polynucléaires éosinophiles CD11b<sup>+</sup> de la lèvre, **E)** Lymphocytes CD11b<sup>-</sup> de la lèvre, **F)** PNN CD11b<sup>+</sup> du TG, **G)** Monocytes / phagocytes CD11b<sup>+</sup> du TG, **H)** Lymphocytes CD11b<sup>+</sup> du TG, **I)** PNE CD11b<sup>+</sup> du TG, **J)** Lymphocytes CD11b<sup>-</sup> du TG.

**Partie inférieure :** Proportions relatives de neutrophiles, cellules phagocytaires mononucléées, lymphocytes, polynucléaires éosinophiles et plasmocytes dans les suspensions de cellules de la lèvre (**K**) et du le TG (**L**).

## 5 Discussion

### 5.1 Pourquoi un délai de 4 jours pour obtenir une protection par TK<sub>del</sub> ?

Nous avons précédemment montré dans le modèle murin OO que dans le cadre d'une infection par une souche virulente d'HSV1 (SC16), l'atteinte oculaire et la réactivation à partir de la latence dans le TG étaient restreintes au côté homolatéral à l'inoculation dans la lèvre [244], alors même que l'ADN viral est présent dans les 2 TG, témoignant de la mise en place d'un phénomène de protection dans le TG controlatéral à l'inoculation (**Annexe 1**).

De façon complémentaire, une première inoculation avec une souche non neurovirulente (TK<sub>del</sub>) confère cette protection bilatérale, de telle sorte qu'une réinfection avec SC16 (dans la lèvre controlatérale) n'entraîne aucun signe clinique d'infection systémique ou oculaire, et bloque même le potentiel de réactivations à partir des TG infectés de façon latente (testées *ex vivo*). Toutefois, cette protection est efficace à la condition qu'un délai minimum de 4 jours entre l'inoculation de la souche primo-infectante et celle de la souche ré-infectante soit respecté [244].

Nos résultats montrent clairement que ce délai de 4 jours correspond au délai nécessaire pour que l'infiltrat immunitaire au site d'inoculation initial de SC16 ou TK<sub>del</sub> soit maximal (**Figure 22**). Il correspond aussi au délai nécessaire pour constater une infiltration significative en LTCD4<sup>+</sup> et LTCD8<sup>+</sup> dans les lèvres inoculées de groupes SC16 et TK<sub>del</sub> (**Figure 23 C & D**).

Ce délai était aussi retrouvé par le groupe de Francis Carbone, sur des modèles murins d'infection cutanée d'HSV-1. Dans l'étude de Coles et al. où l'inoculation d'HSV-1 avait lieu dans le coussinet plantaire, il fallait également 4 jours pour observer une migration dans le corps entier des LT effecteurs spécifiques d'HSV-1 après activation dans les ganglions lymphatiques drainant le site d'inoculation [194]. Van Lint et al. montraient sur un autre modèle d'inoculation cutanée, dans le flanc cette fois, que ces LT spécifiques, présents encore une fois à J4 au site d'inoculation, permettaient de limiter la réplication virale, mais arrivaient trop tard pour empêcher la dissémination et la réplication dans les ganglions nerveux sensitif [195]. C'est d'ailleurs également le cas dans notre modèle, puisqu'après une inoculation labiale, le virus se réplique déjà dans le TG ipsilatéral à J4 [120]. En revanche, la réplication dans le TG controlatéral n'est observée qu'à J6, c'est-à-dire un délai suffisant pour qu'interviennent d'éventuels LT spécifiques afin de bloquer la réplication virale.



Ainsi, nous pensons que l'activation de LT effecteurs spécifiques par une inoculation labiale pourrait être un élément clef dans la protection du TG controlatéral et restreindre la maladie herpétique à l'unilatéralité.

Lors de la réinfection, l'inoculation préalable par TK<sub>del</sub> pourrait induire une immunosurveillance par des LT effecteurs mémoires [245], qui permettrait à ces derniers de répondre plus précocement dans la lèvre réinfectée, (**Figure 23 C & D**), sans pour autant empêcher la dissémination de la souche ré-infectante aux 2 TG [244].

## 5.2 Effet de la primo-infection par TK<sub>del</sub> la sur la cinétique de l'infiltrat

Quand l'inoculation par TK<sub>del</sub> dans la lèvre droite était suivie 4 jours plus tard d'une réinfection par SC16 dans la lèvre gauche, nous constatons un recrutement plus précoce des cellules immunitaires CD45<sup>+</sup> dans la lèvre gauche (à J2). Cet infiltrat, à la fois précoce et d'une amplitude équivalente à celui induit par l'inoculation de SC16 à J4, constituait une particularité immunologique au site de réinfection. Cette rapidité d'installation de la réponse immunitaire pourrait être un élément clef dans la protection. Canivet *et al.*, ont en effet démontré dans un modèle murin d'encéphalite herpétique, (par inoculation intranasale), que le recrutement précoce de cellules immunitaires dans les tissus du SNC jouait un rôle essentiel dans le contrôle de l'infection. Dans ce modèle, les souris de lignée C57BL/6, dont la réponse immune s'installe très rapidement, ont une susceptibilité diminuée à l'infection, tandis que les souris BALB/c, dont l'infiltration par les cellules immunitaire du SNC est retardée, ont des atteintes cliniques beaucoup plus marquées [246].

Ces résultats suggèrent que dans notre modèle, le recrutement rapide des cellules immunitaires dans la lèvre réinfectée, (induit par l'infection préalable par TK<sub>del</sub>) pourrait conférer un contrôle plus efficace de la réplication d'HSV-1, et réduire ainsi la charge virale parvenant aux TG.





### 5.3 Différents profils d'inflammation au site d'inoculation

HSV-1 est détecté par le système immunitaire via les PRR dans les heures qui suivent l'infection [128]. La détection des PAMP d'HSV-1 déclenche localement un processus pro-inflammatoire dans lequel la sécrétion de chémokines inflammatoires permet le recrutement de différents types de cellules immunitaires au site de l'inflammation [128 247 248]. Certaines chémokines dépendent de la présence de types cellulaires spécifiques, qui dépendent de l'expression des différents profils de PRR. Ainsi, différents profils de signalisation qui induisent des modifications de la réponse immunitaire, peuvent être déclenchés par la présence du virus et des PAMP viraux [249-251]. En outre, la production d'IFN de type I et III, de TNF- $\alpha$ , d'IL-6 et de CXCL10 est une conséquence directe de la détection (*sensing*) d'HSV-1 [128], alors que l'IFN de type II et l'IL10 peuvent rétro-contrôler l'expression des chémokines inflammatoires, et modifier la réponse immune dans les tissus infectés [251 252].

Notre technique d'inoculation utilise une aiguille en verre ultra-fine [253], de façon à réduire le niveau d'inflammation induit par le processus d'inoculation lui-même. Toutefois, le traumatisme de la barrière cutanéomuqueuse lié à l'injection s'accompagne d'une réaction inflammatoire, aussi minime soit-elle [254]. Nous avons d'ailleurs détecté une augmentation minime, mais sensible, des cellules de l'immunité innée dans les lèvres injectées avec du PBS (groupe contrôle) à J2, qui s'estompait dès J4 (**Figure 23 E-J**). Cette réaction précoce était également présente dans les autres groupes, mais augmentait à J4, en réponse à la réplication virale.

Des niveaux comparables des chémokines CCL5, CCL11, CXCL1, CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3, CCL4 étaient retrouvés dans les lèvres infectées par SC16 et TK<sub>del</sub> au cours de la phase aiguë de l'infection (**Figure 25 A et B, respectivement**),

De façon notable, l'infiltration par les monocytes inflammatoires du site d'inoculation n'avait pas lieu dans les lèvres réinfectées par SC16, de même que le pic de CCL2 (**Figure 25 C**). Ces données suggèrent que les processus de signalisation induits par la réplication virale, qui recrutent des monocytes à J4 sont réduits, voire absents dans les lèvres réinfectées par SC16.



## 5.4 Différents profils d'inflammation dans les TG

Dans les TG, les concentrations en chémokines inflammatoires étaient nettement moindres dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub> (**Figure 29 A et B**, respectivement) que dans les iTG du groupe SC16.

Cette différence est vraisemblablement liée au caractère non virulent de TK<sub>del</sub>. Ce virus ne peut en effet pas se répliquer dans les neurones [237]. L'absence de réplication, et l'expression très limitée des gènes lytiques par les neurones infectés par TK<sub>del</sub> [255] diminue très probablement les dommages cellulaires et l'exposition des PAMP viraux.

Dans notre étude, les pics de concentration de chémokines survenaient à J6 dans les iTG du groupe TK<sub>del</sub> versus J4 dans ceux du groupe SC16 (**Figure 29 A et B**). Ces délais coïncident avec les pics de monocytes inflammatoires dans les iTG respectifs, et suggèrent d'une part que le *sensing* de TK<sub>del</sub> est retardée, et d'autre part que les monocytes inflammatoires produisent, ou au moins sont impliqués, dans la production des chémokines inflammatoires. En outre, l'infiltrat réduit et retardé en monocytes inflammatoires dans les TG des groupes réinfection et TK<sub>del</sub> (**Figure 27 E**) allait de paire avec l'absence des autres populations inflammatoires, telles que les macrophages, les PNN et les PNE (**Figure 27 E-I**). L'ensemble de ces données est en faveur d'un contrôle de la réplication virale dans les TG ipsilatéraux à l'inoculation de SC16 du groupe réinfection, où nos travaux précédents avaient montré un niveau très diminué de réplication virale [244]. A l'opposé, l'expression plus élevée et prolongée des chémokines inflammatoires dans les iTG du groupe SC16 montre bien que la réplication virale est à l'origine du recrutement de cellules inflammatoires.

## 5.5 Le modèle expérimental influence les résultats des études immunologiques portant sur l'infection par HSV-1, et notamment le rôle des PNN

Comme nous l'avons vu dans l'introduction de ce travail, de nombreux types de cellules immunitaires sont impliqués dans le contrôle de l'infection par HSV-1 [256]. Les monocytes inflammatoires, notamment, sont en première ligne, pour initier la réaction inflammatoire, recruter les NK au site de l'infection puis se différencier en macrophages et en DC [257-260]. Les NK,



activées par les autres types cellulaires, ou par la reconnaissance directe d'HSV-1, lysent les cellules infectées [125], tandis que les cellules CD11b<sup>+</sup> induisent les lésions histologiques dans la cornée et réduisent la réplication virale dans ce tissu [261].

Toutefois, il est difficile d'être certain des rôles respectifs de ces cellules dans la mesure où leur action a été étudiée dans des modèles différents des conditions rencontrées chez l'homme, notamment celui reposant sur une inoculation par scarification cornéenne. En effet, ce modèle modifie complètement le cours de l'infection [60], car la cornée bénéficie d'un privilège immunitaire alors que les tissus cutanéomuqueux, où la primo-infection a lieu chez l'homme (et dans notre modèle) sont spécialisés dans la réponse immunitaire aux agents infectieux [262 263].

Dans notre modèle, les PNN constituent la principale population infiltrant les lèvres (**Figure 24**), et un contingent important de l'infiltrat du TG dans les premiers jours de l'infection (**Figure 28**). Dans d'autres modèles d'infection cutanéomuqueuse, ces cellules ne semblent pas essentielles pour contrôler la maladie [264]. Par ailleurs, ces cellules ne transportent pas les antigènes aux ganglions lymphatiques [265]. A l'inverse, plusieurs études menées sur des modèles d'infection par scarification cornéenne ont montré un rôle bénéfique des PNN sur l'infection, participant activement à la clairance virale, et au recrutement de lymphocytes T [154 266 267]. Mais, pour compliquer les choses, une étude récente montrait que l'infiltration cornéenne par les PNN contribuait à une augmentation de la réplication virale intracornéenne et augmentait la dissémination du virus au système nerveux (TG), en raison d'une réplication d'HSV-1 au sein des PNN... Les auteurs concluaient que dans ce modèle, les PNN potentialisaient l'infection et sa dissémination [157]. Enfin, les PNN jouent un rôle très délétère sur le contrôle viral et la survie des souris dans de modèles d'encéphalite herpétique ou l'inoculation est réalisée par scarification cornéenne [156].

Dans notre étude, l'infiltrat de PNN dans la lèvre était prépondérant aux premiers temps de la phase aiguë (J2 à J6) dans les groupes SC16 et réinfection (**Figure 24**), mais sa diminution aux temps ultérieurs était plus drastique dans le groupe réinfection. Au niveau du TG, la proportion de PNN dans ces deux groupes était moindre, et diminuait dès J6. Il s'agissait dans tous le cas de PNN matures (**Figure 30**). Compte tenu de l'ensemble de ces données, la place des PNN reste donc



encore mal cernée, et des études supplémentaires seront nécessaires pour comprendre leurs rôles exacts dans le contrôle de l'infection herpétique.

## **5.6 Les polynucléaires éosinophiles pourraient être impliqués dans le contrôle de l'infection par HSV-1**

Nous avons mis en évidence la présence d'un contingent significatif de PNE dans les lèvres infectées par HSV-1 de tous les groupes, (**Figure 23 H**), mais seulement les iTG du groupe SC16 (**Figure 27 H**), qui sont les seuls TG associés à une réplication virale lytique, une atteinte oculaire, et une réactivation possible à partir de la latence [120 244]. La présence de ces cellules, détectée en CMF, a été confirmée par l'étude cytologique (**Figure 30**). Cet infiltrat de PNE était concomitant d'une augmentation de CCL11 (**Figures 25 et 29**), une chémokine également connue sous le nom d'éotaxine-1, et dont le rôle biologique est spécifiquement de recruter les PNE.

### **Des associations épidémiologiques et nosologiques entre PNE et HSV-1 :**

Le rôle des PNE dans l'infection par HSV-1 n'a jusqu'à présent pas été décrit. Il semble toutefois exister des liens entre ce type cellulaire et l'infection herpétique, en particulier dans le contexte des maladies allergiques.

Concernant les kératites herpétiques, des études épidémiologiques d'envergure ont montré que les infections herpétiques oculaires sont plus fréquentes et souvent plus sévères chez les patients allergiques [159]. Par ailleurs, chez les atopiques, le traitement antiviral préventif semble moins efficace pour réduire le nombre d'épisode de kératite herpétique sévère (kératites stromales et endothéliales) [160].

En dermatologie, il est bien connu que la surinfection par HSV-1 des lésions d'eczéma est particulièrement sévère (syndrome de Kaposi-Juliusberg ou *eczema herpeticum*) [161]. Enfin, Douljik et al. ont montré que l'activité phagocytaires des éosinophiles était augmentée chez les patients souffrants d'herpes labiaux (HSV-1) et génitaux (HSV-2) [162].

### **Un rôle dans la dissémination virale ?**

Une hypothèse possible est le rôle potentiellement facilitateur des PNE dans la transmission inter-cellulaire du virus, via l'augmentation des connections et de la densité du réseau



neuronal, qui est décrite dans la peau des patients atteints de dermatite atopique. Foster et al. ont ainsi démontré que les PNE induisaient une augmentation des branchements neuronaux sur la peau des souris dans un modèle d'atopie [268]. Les PNE pourraient, par ce mécanisme, faciliter le passage intercellulaire d'HSV-1 dans les lèvres ou les TG infectés [269].

## 5.7 La primo-infection par TK<sub>del</sub> renforce l'immunosurveillance dans la lèvre

La transmission des antigènes d'HSV-1 des tissus cutané-muqueux vers les ganglions lymphatiques a lieu par l'intermédiaire des cellules de Langerhans et des cellules dendritiques du derme [270], vers les DC conventionnelles qui vont les présenter aux lymphocytes T [271]

Dans notre étude, le nombre de DC dans les lèvres infectées par SC16 augmentait plutôt tardivement, à la fin de la phase aiguë et à la phase de latence (**Figure 23**). En revanche, leur nombre était augmenté dès J2 dans les lèvres ré-infectées. Ces infiltrats pourraient d'ailleurs comporter des DC activant les réponses T spécifiques [272]. Ces données suggèrent donc que dans les souris primo-infectées par TK<sub>del</sub>, un niveau d'immunosurveillance plus élevé est établi à J4, permettant un meilleur contact avec les cellules présentatrices d'antigène professionnelles, et par conséquent potentiellement une meilleure activation des lymphocytes T spécifiques.

En outre, on notait que les DC CD11b<sup>+</sup> et CD11b<sup>-</sup> étaient présentes à J28 (phase de latence) dans les lèvres et les TG de tous les groupes, (**Figures 23 et 27 I & J**), ce qui suggérait que l'immunosurveillance mise en place pendant la phase aiguë persistait en latence, après la phase de réplication virale lytique.

Notre panel de définition ne nous permettait pas de discriminer les sous-populations de CD11b<sup>+</sup>, qui pourraient inclure des DC dérivés des monocytes, des DC conventionnelles, des macrophages ou des cellules gliales [257 272-275]. Pour cette raison, des expérimentations complémentaires doivent être réalisées pour mieux définir les sous-populations de CD11b<sup>+</sup> et leurs rôles spécifiques dans notre modèle.



## 5.8 La souche non neurovirulente TK<sub>del</sub> : avantages et inconvénients

### Propriétés spécifiques de la souches TK<sub>del</sub>

La TK cellulaire intervient dans la réplication de l'ADN, avant la division cellulaire. Elle n'est donc pas produite par les cellules qui ne se divisent pas (dites post-mitotiques), comme les neurones et les polynucléaires mûres. En l'absence de TK exogène (cellulaire), la souche TK<sub>del</sub> n'est donc pas capable de se répliquer. Pour cette raison, TK<sub>del</sub> ne peut pas répliquer son génome dans les neurones [237]. Néanmoins, TK<sub>del</sub> a la capacité d'infecter et de se répliquer dans les tissus cutanéomuqueux de la lèvre (où de nombreux types cellulaires, se renouvellent), d'infecter les terminaisons neuronales locales, puis de migrer vers les noyaux des neuronaux situés dans le TG où il peut entrer en latence [237 276]. Par contre, pour les raisons vues ci-dessus, cette souche n'est pas capable de se réactiver dans ces neurones, faute de TK indispensable à la production d'ADN viral.

### Avantages :

Dans notre étude, les lèvres inoculées avec TK<sub>del</sub> étaient le siège d'un infiltrat immunitaire relativement comparable à celui retrouvé dans les lèvres inoculées par SC16 (**Figure 23 E-I**). En revanche, on constatait une réduction majeure de la réponse inflammatoire dans les TG ipsilatéraux à une inoculation par TK<sub>del</sub> par rapport aux TG ipsilatéraux à une inoculation par SC16 (**Figure 27 E-I**),

Il est également possible que TK<sub>del</sub> ne puisse pas se répliquer dans certaines cellules immunitaires (comme les PNN) à l'inverse des souches virulentes [277]. Le mécanisme de réplication dans les PNN, incriminé dans leur rôle délétère pour l'infection, est d'ailleurs lié à cette capacité d'HSV1 de les utiliser comme usine de réplication [157], notamment dans la cornée, ce qui ne peut donc pas être le cas avec une souche TK<sub>del</sub>. Au contraire, une infection de ces cellules, sans réplication, pourrait moduler la réponse contre HSV-1, en permettant au PNN de contribuer à la présentation de l'antigène [278].

### Inconvénients :

Le principal problème de la souche TK<sub>del</sub>, provient de sa capacité à être trans-complémentée dans le TG par un autre virus, c'est-à-dire, utiliser la TK d'une autre souche co-infectante, intacte



pour la TK [237 279 280]. Ce phénomène, documenté dans des modèles murins [237 279], explique tout à fait la constatation faite en pratique clinique de porteurs d'infection à HSV-1 résistantes aux traitements.

Dans les infections systémiques, près de 95% des résistances d'HSV-1 sont liée à une mutation dans le gène de la thymidine kinase [281-283]. Dans le contexte des infections oculaires, cette proportion est moins documentée mais elle semble du même ordre [28] [31]. Ces mutations rendent inefficaces la plupart des traitements antiviraux disponibles. En effet, les inhibiteurs nucléosidiques de l'ADN polymérase virale doivent être phosphorylés par la TK virale pour être incorporés et bloquer la synthèse de l'ADN viral. Les alternatives efficaces (trifluridine par voie topique, et foscavir) sont beaucoup moins bien tolérées, et n'existent pas par voie orale, ne permettant donc pas d'instaurer un traitement prophylactique des récurrences. Par conséquent, les kératites liées à des virus TK<sub>del</sub> sont de mauvais pronostic [33]. Pour toutes ces raisons, l'utilisation d'une souche uniquement modifiée pour TK n'est pas concevable à des fins thérapeutiques.



## Conclusion et perspectives :

Notre étude apporte donc des éléments importants pour comprendre la relation entre la cinétique de l'infection par HSV-1 et celle de la réponse immunitaire, en fonction du type de souche utilisée et de la séquence d'inoculation.

Basée sur le modèle oro-oculaire, qui reproduit les points clefs de l'infection par HSV-1 chez l'homme, ces données aident à comprendre le caractère unilatéral des kératites herpétiques, et donnent de nouveaux arguments en faveur de la faisabilité d'une stratégie thérapeutique préventive de la maladie herpétique oculaire, basée sur l'utilisation vaccinale de souches modifiées d'HSV-1.

En effet, nous avons démontré des modifications dans la réaction immunitaire locale (i.e. recrutement de lymphocytes dans le site de l'inoculation, et réduction/absence de cellules inflammatoires et de chémokines pendant la phase aiguë de l'infection de réplication virale), associées au développement d'une protection contre les signes cliniques de la maladie, et contre les réactivations. Cette protection, qui se produit naturellement après une inoculation virale dans la lèvre pourrait être utilisée comme base pour le développement d'une stratégie vaccinale. Toutefois, cet objectif nécessite d'une part de caractériser mieux encore les phénomènes immunitaires impliqués dans cette protection, et d'autre part d'améliorer la sécurité de la souche vaccinale potentielle qu'est TK<sub>del</sub>.

## Perspectives sur la caractérisation de la réaction immunitaire

Comme nous l'avons vu, les LT jouent un rôle direct dans le contrôle de l'infection par HSV-1, au niveau du site d'inoculation, en éliminant les cellules infectées [195], et dans le TG, en contrôlant les réactivations par des mécanismes de protection non cytolytiques [198]. Une étude a récemment démontré que les lymphocytes T des patients atteints de récurrences herpétiques avaient des déficiences fonctionnelles et des marqueurs d'épuisement, alors que la réponse T globale contre HSV-1 était similaire chez les patients infectés, qu'ils présentent ou non des récurrences cliniques [201]. L'étude de la différenciation fonctionnelle des LT semble être une piste majeure à poursuivre pour mieux caractériser la réaction immunitaire dans notre modèle. Nous





sommes actuellement en train de mettre au point un panel de CMF pour évaluer la différenciation fonctionnelle et l'épuisement des lymphocytes T dans notre modèle.

L'étude de spécificité des lymphocytes T engagés aux sites d'inoculation et dans le TG est un autre aspect essentiel pour mieux définir les phénomènes immunitaires liés aux phénomènes de protection. Notre équipe collabore déjà avec le laboratoire de David Price (*University of Cardiff, Department of Medical Biochemistry and Immunology*), pour tester des monomères de complexes CMH-épitopes d'HSV-1. Ces molécules devraient nous permettre de détecter des sous-populations de LTCD8<sup>+</sup> spécifiques d'HSV-1 et propres aux souris de souche BALB/c [284]. Nous étudierons la fonctionnalité, le phénotype d'activation et/ou d'épuisement de cette sous-population spécifique au site d'inoculation et dans les TG au cours de l'infection aiguë, de l'infection latente et sur des explants de TG en organoculture (afin d'étudier les phénomènes immunologiques associés à la réactivation). Les données de ces expérimentations détermineront si la souche TK<sub>del</sub> entraîne effectivement une différenciation fonctionnelle et un phénotype des LT différents de ceux induits par la souche SC16. Nous espérons pouvoir démontrer un déséquilibre des phénotypes des LT CD8 résidents dans les TG ipsilatéraux et controlatéraux à l'inoculation.

Notre étude devra par ailleurs être complétée par une définition plus précise des mécanismes de présentations de l'antigène impliqués dans notre modèle. Le sort et la fonctionnalité des LT sont en effet dictés par le contact initial avec l'antigène présenté par les CPA [285]. Or les modalités d'activation des sous-populations de CPA sont diverses et influent la réponse immunitaire adaptative [286]. Il s'agira de mieux caractériser les sous-populations de cellules dendritiques impliquées dans le modèle OO. Nous pourrions également définir les sous-populations de CPA qui interagissent avec les LTCD8<sup>+</sup> dans les TG et au site d'inoculation. Des avancées technologiques récentes ont permis de pousser ce type d'étude au niveau d'une cellule unique [287].

## **Optimisation de la souche TK<sub>del</sub> et du protocole de vaccination**

Comme nous l'avons vu, la souche TK<sub>del</sub> n'est en l'état pas utilisable comme souche vaccinale. Le risque d'une transcomplémentation, qui lui permettrait de réactiver et de causer des



pathologies oculaires difficiles à traiter, impose des modifications supplémentaires pour améliorer sa sécurité.

Pour mener à bien cette amélioration, il faudrait diminuer cette possibilité de transcomplémentation.

Par ailleurs, nous avons d'ores et déjà commencé à tester l'efficacité d'autres voies d'inoculation de la souche TK<sub>del</sub> (sous-cutanée notamment) afin d'évaluer le caractère indispensable de l'injection par voie intra-labiale.

Enfin, il faudra plus tard réfléchir au meilleur agenda vaccinal, bien que le mode de fonctionnement que nous avons mis à jour laisse suggérer qu'une vaccination prophylactique, survenant avant toute primo-infection par une souche sauvage, soit la seule option possible pour espérer une pleine efficacité.

Tous ces éléments sont autant d'axes de recherche que notre équipe entend poursuivre avec détermination dans la quête d'une prévention efficace des atteintes oculaires liée au virus HSV-1.



## Références

1. Liesegang TJ. Epidemiology of ocular herpes simplex. Natural history in Rochester, Minn, 1950 through 1982. *Arch Ophthalmol* **1989**;107(8):1160-5.
2. McElwee M, Beilstein F, Labetoulle M, Rixon FJ, Padeloup D. Dystonin/BPAG1 promotes plus-end-directed transport of herpes simplex virus 1 capsids on microtubules during entry. *J Virol* **2013**;87(20):11008-18.
3. Miranda-Saksena M, Denes CE, Diefenbach RJ, Cunningham AL. Infection and Transport of Herpes Simplex Virus Type 1 in Neurons: Role of the Cytoskeleton. *Viruses* **2018**;10(2).
4. Farooq AV, Shukla D. Herpes simplex epithelial and stromal keratitis: an epidemiologic update. *Surv Ophthalmol* **2012**;57(5):448-62.
5. McQuillan G, Kruszon-Moran D, Flagg EW, Paulose-Ram R. Prevalence of Herpes Simplex Virus Type 1 and Type 2 in Persons Aged 14-49: United States, 2015-2016. *NCHS data brief* **2018**(304):1-8.
6. Wang K, Lau TY, Morales M, Mont EK, Straus SE. Laser-capture microdissection: refining estimates of the quantity and distribution of latent herpes simplex virus 1 and varicella-zoster virus DNA in human trigeminal Ganglia at the single-cell level. *J Virol* **2005**;79(22):14079-87.
7. Pica F, Volpi A. Public awareness and knowledge of herpes labialis. *Journal of medical virology* **2012**;84(1):132-7.
8. Rozenberg F, Deback C, Agut H. Herpes simplex encephalitis : from virus to therapy. *Infectious disorders drug targets* **2011**;11(3):235-50.
9. Schmutzhard E. Viral infections of the CNS with special emphasis on herpes simplex infections. *Journal of neurology* **2001**;248(6):469-77.
10. Casrouge A, Zhang SY, Eidenschenk C, et al. Herpes simplex virus encephalitis in human UNC-93B deficiency. *Science* **2006**;314(5797):308-12.
11. Zhang SY, Jouanguy E, Ugolini S, et al. TLR3 deficiency in patients with herpes simplex encephalitis. *Science* **2007**;317(5844):1522-7.
12. Sancho-Shimizu V, Zhang SY, Abel L, et al. Genetic susceptibility to herpes simplex virus 1 encephalitis in mice and humans. *Current opinion in allergy and clinical immunology* **2007**;7(6):495-505.
13. Audry M, Ciancanelli M, Yang K, et al. NEMO is a key component of NF-kappaB- and IRF-3-dependent TLR3-mediated immunity to herpes simplex virus. *The Journal of allergy and clinical immunology* **2011**;128(3):610-7.e1-4.
14. Dupuis S, Jouanguy E, Al-Hajjar S, et al. Impaired response to interferon-alpha/beta and lethal viral disease in human STAT1 deficiency. *Nature genetics* **2003**;33(3):388-91.
15. Looker KJ, Magaret AS, May MT, et al. First estimates of the global and regional incidence of neonatal herpes infection. *The Lancet. Global health* **2017**;5(3):e300-e09.
16. Harris JB, Holmes AP. Neonatal Herpes Simplex Viral Infections and Acyclovir: An Update. *The journal of pediatric pharmacology and therapeutics : JPPT : the official journal of PPAG* **2017**;22(2):88-93.
17. Labetoulle M, Auquier P, Conrad H, et al. Incidence of herpes simplex virus keratitis in France. *Ophthalmology* **2005**;112(5):888-95.
18. Young RC, Hodge DO, Liesegang TJ, Baratz KH. Incidence, recurrence, and outcomes of herpes simplex virus eye disease in Olmsted County, Minnesota, 1976-2007: the effect of oral antiviral prophylaxis. *Arch Ophthalmol* **2010**;128(9):1178-83.
19. Liesegang TJ. Herpes simplex virus epidemiology and ocular importance. *Cornea* **2001**;20(1):1-13.
20. Labetoulle M, Kucera P, Ugolini G, et al. Neuronal pathways for the propagation of herpes simplex virus type 1 from one retina to the other in a murine model. *The Journal of general virology* **2000**;81(Pt 5):1201-10.
21. Legeais JM, Parc C, d'Hermies F, Pouliquen Y, Renard G. Nineteen years of penetrating keratoplasty in the Hotel-Dieu Hospital in Paris. *Cornea* **2001**;20(6):603-6.
22. Reynaud C, Rousseau A, Kaswin G, M'Garrech M, Barreau E, Labetoulle M. Persistent Impairment of Quality of Life in Patients with Herpes Simplex Keratitis. *Ophthalmology* **2017**;124(2):160-69.



23. James SH, Prichard MN. Current and future therapies for herpes simplex virus infections: mechanism of action and drug resistance. *Current opinion in virology* **2014**;8c:54-61.
24. MacDougall C, Guglielmo BJ. Pharmacokinetics of valaciclovir. *The Journal of antimicrobial chemotherapy* **2004**;53(6):899-901.
25. Wilhelmus KR. Therapeutic interventions for herpes simplex virus epithelial keratitis. *The Cochrane database of systematic reviews* **2008**(1):CD002898.
26. Wilhelmus KR, Beck RW, Moke PS, et al. Acyclovir for the prevention of recurrent herpes simplex virus eye disease. Herpetic Eye Disease Study Group. *N Engl J Med* **1998**;339(5):300-6.
27. Wald A, Corey L, Timmler B, et al. Helicase-primase inhibitor pritelivir for HSV-2 infection. *N Engl J Med* **2014**;370(3):201-10.
28. Duan R, de Vries RD, Osterhaus AD, Remeijer L, Verjans GM. Acyclovir-resistant corneal HSV-1 isolates from patients with herpetic keratitis. *J Infect Dis* **2008**;198(5):659-63.
29. van Velzen M, van de Vijver DA, van Loenen FB, Osterhaus AD, Remeijer L, Verjans GM. Acyclovir prophylaxis predisposes to antiviral-resistant recurrent herpetic keratitis. *J Infect Dis* **2013**;208(9):1359-65.
30. van Velzen M, Missotten T, van Loenen FB, et al. Acyclovir-resistant herpes simplex virus type 1 in intra-ocular fluid samples of herpetic uveitis patients. *Journal of clinical virology : the official publication of the Pan American Society for Clinical Virology* **2013**;57(3):215-21.
31. Rousseau A, Boutolleau D, Titier K, et al. Recurrent herpetic keratitis despite antiviral prophylaxis: A virological and pharmacological study. *Antiviral research* **2017**;146:205-12.
32. Burrel S, Deback C, Agut H, Boutolleau D. Genotypic characterization of UL23 thymidine kinase and UL30 DNA polymerase of clinical isolates of herpes simplex virus: natural polymorphism and mutations associated with resistance to antivirals. *Antimicrobial agents and chemotherapy* **2010**;54(11):4833-42.
33. Rousseau A, Burrel S, Gueudry J, et al. Aciclovir-resistant HSV1 keratitis: a clinical and virological study. *Acta ophthalmologica* **2018**;96(S261):110-11.
34. Frobert E, Burrel S, Ducastelle-Lepretre S, et al. Resistance of herpes simplex viruses to acyclovir: An update from a ten-year survey in France. *Antiviral research* **2014**.
35. Kumar M, Hill JM, Clement C, Varnell ED, Thompson HW, Kaufman HE. A double-blind placebo-controlled study to evaluate valacyclovir alone and with aspirin for asymptomatic HSV-1 DNA shedding in human tears and saliva. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2009**;50(12):5601-8.
36. Sengler U, Reinhard T, Adams O, Krempe C, Sundmacher R. Herpes simplex virus infection in the media of donor corneas during organ culture: frequency and consequences. *Eye* **2001**;15(Pt 5):644-7.
37. Biswas S, Suresh P, Bonshek RE, Corbitt G, Tullo AB, Ridgway AE. Graft failure in human donor corneas due to transmission of herpes simplex virus. *The British journal of ophthalmology* **2000**;84(7):701-5.
38. Remeijer L, Maertzdorf J, Doornenbal P, Verjans GM, Osterhaus AD. Herpes simplex virus 1 transmission through corneal transplantation. *Lancet* **2001**;357(9254):442.
39. Thuret G, Acquart S, Gain P, et al. Ultrastructural demonstration of replicative herpes simplex virus type 1 transmission through corneal graft. *Transplantation* **2004**;77(2):325-6.
40. Zheng X. Reactivation and donor-host transmission of herpes simplex virus after corneal transplantation. *Cornea* **2002**;21(7 Suppl):S90-3.
41. Mietz H, Cassinotti P, Siegl G, Kirchhof B, Kriegelstein GK. Detection of herpes simplex virus after penetrating keratoplasty by polymerase chain reaction: correlation of clinical and laboratory findings. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **1995**;233(11):714-6.
42. Cockerham GC, Bijwaard K, Sheng ZM, Hidayat AA, Font RL, McLean IW. Primary graft failure : a clinicopathologic and molecular analysis. *Ophthalmology* **2000**;107(11):2083-90;discussion 90-1.
43. Lomholt JA, Baggesen K, Ehlers N. Recurrence and rejection rates following corneal transplantation for herpes simplex keratitis. *Acta ophthalmologica Scandinavica* **1995**;73(1):29-32.
44. The Australian Corneal Graft Registry. 1990 to 1992 report. *Australian and New Zealand journal of ophthalmology* **1993**;21(2 Suppl):1-48.
45. Roizman B, Pelett PE. The Family Herpesviridae: A brief Introduction. In: Knipe DM, Howley PM, Griffin DE, Lamb RA, Martin MA, Roizman B, eds. *Fields Virology* 4th Edition.



- Philadelphia: Lippincott Raven, 2001:2381-97.
46. Crépin S, Labetoulle M. Alphaherpesvirinae (1): Généralités sur les herpèvirus et virus de l'herpès simplex. In: Labetoulle M, ed. Herpès et Zona oculaire: de la clinique au traitement. Paris: Med'Com, 2009:13-26.
  47. Brown JC, Newcomb WW. Herpesvirus capsid assembly: insights from structural analysis. *Current opinion in virology* **2011**;1(2):142-9.
  48. Hulo C, de Castro E, Masson P, et al. ViralZone: a knowledge resource to understand virus diversity. *Nucleic acids research* **2011**;39(Database issue):D576-82.
  49. Roizman B, Ward PL. Simplexvirus. In: Tidona C, Darai G, eds. *The Springer Index of Viruses*: Springer, 2011:663-70.
  50. Liesegang TJ. Biology and molecular aspects of herpes simplex and varicella-zoster virus infections. *Ophthalmology* **1992**;99(5):781-99.
  51. David AT, Saied A, Charles A, Subramanian R, Chouljenko VN, Kousoulas KG. A herpes simplex virus 1 (McKrae) mutant lacking the glycoprotein K gene is unable to infect via neuronal axons and egress from neuronal cell bodies. *mBio* **2012**;3(4):e00144-12.
  52. Devadas D, Koithan T, Diestel R, Prank U, Sodeik B, Dohner K. Herpes simplex virus internalization into epithelial cells requires Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> exchangers and p21-activated kinases but neither clathrin- nor caveolin-mediated endocytosis. *J Virol* **2014**;88(22):13378-95.
  53. Roberts AP, Abaitua F, O'Hare P, McNab D, Rixon FJ, Padeloup D. Differing roles of inner tegument proteins pUL36 and pUL37 during entry of herpes simplex virus type 1. *J Virol* **2009**;83(1):105-16.
  54. Xu P, Mallon S, Roizman B. PML plays both inimical and beneficial roles in HSV-1 replication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2016**;113(21):E3022-8.
  55. Gu H, Zheng Y, Roizman B. Interaction of herpes simplex virus ICP0 with ND10 bodies: a sequential process of adhesion, fusion, and retention. *J Virol* **2013**;87(18):10244-54.
  56. Everett RD. HSV-1 biology and life cycle. *Methods in molecular biology* **2014**;1144:1-17.
  57. Roizman B, Knipe DM. Herpesvirus and their replication. In: Knipe DM, Howley PM, Griffin DE, Lamb RA, Martin MA, Roizman B, eds. *Fields Virology*, 4th Edition: Lippincott Raven 2001:2399-459.
  58. Weller SK, Coen DM. Herpes simplex viruses: mechanisms of DNA replication. *Cold Spring Harbor perspectives in biology* **2012**;4(9):a013011.
  59. Melancon JM, Luna RE, Foster TP, Kousoulas KG. Herpes simplex virus type 1 gK is required for gB-mediated virus-induced cell fusion, while neither gB and gK nor gB and UL20p function redundantly in virion de-envelopment. *J Virol* **2005**;79(1):299-313.
  60. Cavallero S, Huot N, Francelle L, Lomonte P, Naas T, Labetoulle M. Biological features of herpes simplex virus type 1 latency in mice according to experimental conditions and type of neurones. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2014**;55(12):7761-74.
  61. Maillet S, Naas T, Crépin S, et al. Herpes simplex virus type 1 latently infected neurons differentially express latency-associated and ICP0 transcripts. *J Virol* **2006**;80(18):9310-21.
  62. Phelan D, Barrozo ER, Bloom DC. HSV1 latent transcription and non-coding RNA: A critical retrospective. *J Neuroimmunol* **2017**;308:65-101.
  63. Sawtell NM. The probability of in vivo reactivation of herpes simplex virus type 1 increases with the number of latently infected neurons in the ganglia. *J Virol* **1998**;72(8):6888-92.
  64. Hagmann M, Georgiev O, Schaffner W, Douville P. Transcription factors interacting with herpes simplex virus alpha gene promoters in sensory neurons. *Nucleic acids research* **1995**;23(24):4978-85.
  65. Valyi-Nagy T, Deshmane S, Dillner A, Fraser NW. Induction of cellular transcription factors in trigeminal ganglia of mice by corneal scarification, herpes simplex virus type 1 infection, and explantation of trigeminal ganglia. *J Virol* **1991**;65(8):4142-52.
  66. Lillycrop KA, Dent CL, Wheatley SC, et al. The octamer-binding protein Oct-2 represses HSV immediate-early genes in cell lines derived from latently infectable sensory neurons. *Neuron* **1991**;7(3):381-90.
  67. Kristie TM, Vogel JL, Sears AE. Nuclear localization of the C1 factor (host cell factor) in sensory neurons correlates with reactivation of herpes simplex virus from latency. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **1999**;96(4):1229-33.



68. La Boissiere S, Hughes T, O'Hare P. HCF-dependent nuclear import of VP16. *The EMBO journal* **1999**;18(2):480-9.
69. Kubat NJ, Tran RK, McAnany P, Bloom DC. Specific histone tail modification and not DNA methylation is a determinant of herpes simplex virus type 1 latent gene expression. *J Virol* **2004**;78(3):1139-49.
70. Dressler GR, Rock DL, Fraser NW. Latent herpes simplex virus type 1 DNA is not extensively methylated in vivo. *The Journal of general virology* **1987**;68 ( Pt 6):1761-5.
71. Kubat NJ, Amelio AL, Giordani NV, Bloom DC. The herpes simplex virus type 1 latency-associated transcript (LAT) enhancer/rcr is hyperacetylated during latency independently of LAT transcription. *J Virol* **2004**;78(22):12508-18.
72. Kwiatkowski DL, Thompson HW, Bloom DC. The polycomb group protein Bmi1 binds to the herpes simplex virus 1 latent genome and maintains repressive histone marks during latency. *J Virol* **2009**;83(16):8173-81.
73. Wang QY, Zhou C, Johnson KE, Colgrove RC, Coen DM, Knipe DM. Herpesviral latency-associated transcript gene promotes assembly of heterochromatin on viral lytic-gene promoters in latent infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2005**;102(44):16055-9.
74. Kristie TM. Dynamic modulation of HSV chromatin drives initiation of infection and provides targets for epigenetic therapies. *Virology* **2015**;479-480:555-61.
75. Cliffe AR, Garber DA, Knipe DM. Transcription of the herpes simplex virus latency-associated transcript promotes the formation of facultative heterochromatin on lytic promoters. *J Virol* **2009**;83(16):8182-90.
76. Krummenacher C, Zabolotny JM, Fraser NW. Selection of a nonconsensus branch point is influenced by an RNA stem-loop structure and is important to confer stability to the herpes simplex virus 2-kilobase latency-associated transcript. *J Virol* **1997**;71(8):5849-60.
77. Nicoll MP, Proenca JT, Efstathiou S. The molecular basis of herpes simplex virus latency. *FEMS microbiology reviews* **2012**;36(3):684-705.
78. Javier RT, Stevens JG, Dissette VB, Wagner EK. A herpes simplex virus transcript abundant in latently infected neurons is dispensable for establishment of the latent state. *Virology* **1988**;166(1):254-7.
79. Perng GC, Slanina SM, Yukht A, et al. A herpes simplex virus type 1 latency-associated transcript mutant with increased virulence and reduced spontaneous reactivation. *J Virol* **1999**;73(2):920-9.
80. Henderson G, Peng W, Jin L, et al. Regulation of caspase 8- and caspase 9-induced apoptosis by the herpes simplex virus type 1 latency-associated transcript. *Journal of neurovirology* **2002**;8 Suppl 2:103-11.
81. Perng GC, Jones C, Ciacci-Zanella J, et al. Virus-induced neuronal apoptosis blocked by the herpes simplex virus latency-associated transcript. *Science* **2000**;287(5457):1500-3.
82. Ahmed M, Lock M, Miller CG, Fraser NW. Regions of the herpes simplex virus type 1 latency-associated transcript that protect cells from apoptosis in vitro and protect neuronal cells in vivo. *J Virol* **2002**;76(2):717-29.
83. Tormanen K, Allen S, Mott KR, Ghiasi H. The Latency-Associated Transcript Inhibits Apoptosis via Downregulation of Components of the Type I Interferon Pathway during Latent Herpes Simplex Virus 1 Ocular Infection. *J Virol* **2019**;93(10).
84. Srivastava R, Dervillez X, Khan AA, et al. The Herpes Simplex Virus Latency-Associated Transcript Gene Is Associated with a Broader Repertoire of Virus-Specific Exhausted CD8+ T Cells Retained within the Trigeminal Ganglia of Latently Infected HLA Transgenic Rabbits. *J Virol* **2016**;90(8):3913-28.
85. Chentoufi AA, Kritzer E, Tran MV, et al. The herpes simplex virus 1 latency-associated transcript promotes functional exhaustion of virus-specific CD8+ T cells in latently infected trigeminal ganglia: a novel immune evasion mechanism. *J Virol* **2011**;85(17):9127-38.
86. Umbach JL, Kramer MF, Jurak I, Karnowski HW, Coen DM, Cullen BR. MicroRNAs expressed by herpes simplex virus 1 during latent infection regulate viral mRNAs. *Nature* **2008**;454(7205):780-3.
87. Umbach JL, Nagel MA, Cohrs RJ, Gilden DH, Cullen BR. Analysis of human alphaherpesvirus microRNA expression in latently infected human trigeminal ganglia. *J Virol*



- 2009**;83(20):10677-83.
88. Kramer MF, Jurak I, Pesola JM, Boissel S, Knipe DM, Coen DM. Herpes simplex virus 1 microRNAs expressed abundantly during latent infection are not essential for latency in mouse trigeminal ganglia. *Virology* **2011**;417(2):239-47.
  89. Nicoll MP, Hann W, Shivkumar M, et al. The HSV-1 Latency-Associated Transcript Functions to Repress Latent Phase Lytic Gene Expression and Suppress Virus Reactivation from Latently Infected Neurons. *PLoS Pathog* **2016**;12(4):e1005539.
  90. Giordani NV, Neumann DM, Kwiatkowski DL, et al. During herpes simplex virus type 1 infection of rabbits, the ability to express the latency-associated transcript increases latent-phase transcription of lytic genes. *J Virol* **2008**;82(12):6056-60.
  91. Kramer MF, Coen DM. Quantification of transcripts from the ICP4 and thymidine kinase genes in mouse ganglia latently infected with herpes simplex virus. *J Virol* **1995**;69(3):1389-99.
  92. Ma JZ, Russell TA, Spelman T, Carbone FR, Tschärke DC. Lytic gene expression is frequent in HSV-1 latent infection and correlates with the engagement of a cell-intrinsic transcriptional response. *PLoS Pathog* **2014**;10(7):e1004237.
  93. Khanna KM, Bonneau RH, Kinchington PR, Hendricks RL. Herpes simplex virus-specific memory CD8+ T cells are selectively activated and retained in latently infected sensory ganglia. *Immunity* **2003**;18(5):593-603.
  94. Margolis TP, Elfman FL, Leib D, et al. Spontaneous reactivation of herpes simplex virus type 1 in latently infected murine sensory ganglia. *J Virol* **2007**;81(20):11069-74.
  95. Feldman LT, Ellison AR, Voytek CC, Yang L, Krause P, Margolis TP. Spontaneous molecular reactivation of herpes simplex virus type 1 latency in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2002**;99(2):978-83.
  96. Sawtell NM. Comprehensive quantification of herpes simplex virus latency at the single-cell level. *J Virol* **1997**;71(7):5423-31.
  97. Abitbol O, Hoang-Xuan T. Herpès et zona oculaire : de la clinique au traitement. In: Labetoulle M, ed. *Herpes et zona oculaire : De la clinique au traitement*. Paris: Med'Com, 2009:193-212.
  98. Cliffe AR, Arbuckle JH, Vogel JL, et al. Neuronal Stress Pathway Mediating a Histone Methyl/Phospho Switch Is Required for Herpes Simplex Virus Reactivation. *Cell host & microbe* **2015**;18(6):649-58.
  99. Deshmane SL, Fraser NW. During latency, herpes simplex virus type 1 DNA is associated with nucleosomes in a chromatin structure. *J Virol* **1989**;63(2):943-7.
  100. Wilson AC, Mohr I. A cultured affair: HSV latency and reactivation in neurons. *Trends in microbiology* **2012**;20(12):604-11.
  101. Thompson RL, Preston CM, Sawtell NM. De novo synthesis of VP16 coordinates the exit from HSV latency in vivo. *PLoS Pathog* **2009**;5(3):e1000352.
  102. Herrera FJ, Triezenberg SJ. VP16-dependent association of chromatin-modifying coactivators and underrepresentation of histones at immediate-early gene promoters during herpes simplex virus infection. *J Virol* **2004**;78(18):9689-96.
  103. Cliffe AR, Knipe DM. Herpes simplex virus ICP0 promotes both histone removal and acetylation on viral DNA during lytic infection. *J Virol* **2008**;82(24):12030-8.
  104. Lomonte P, Thomas J, Texier P, Caron C, Khochbin S, Epstein AL. Functional interaction between class II histone deacetylases and ICP0 of herpes simplex virus type 1. *J Virol* **2004**;78(13):6744-57.
  105. Gu H, Liang Y, Mandel G, Roizman B. Components of the REST/CoREST/histone deacetylase repressor complex are disrupted, modified, and translocated in HSV-1-infected cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2005**;102(21):7571-6.
  106. Wilcox CL, Johnson EM, Jr. Characterization of nerve growth factor-dependent herpes simplex virus latency in neurons in vitro. *J Virol* **1988**;62(2):393-9.
  107. Kim JY, Mandarino A, Chao MV, Mohr I, Wilson AC. Transient reversal of episome silencing precedes VP16-dependent transcription during reactivation of latent HSV-1 in neurons. *PLoS Pathog* **2012**;8(2):e1002540.
  108. Bertke AS, Swanson SM, Chen J, Imai Y, Kinchington PR, Margolis TP. A5-positive primary sensory neurons are nonpermissive for productive infection with herpes simplex virus 1 in vitro. *J Virol* **2011**;85(13):6669-77.



109. Davison AJ. Evolution of sexually transmitted and sexually transmissible human herpesviruses. *Annals of the New York Academy of Sciences* **2011**;1230:E37-49.
110. Sawtell NM, Thompson RL. Rapid in vivo reactivation of herpes simplex virus in latently infected murine ganglionic neurons after transient hyperthermia. *Journal of virology* **1992**;66(4):2150-56.
111. Neumann DM, Bhattacharjee PS, Hill JM. Sodium butyrate: a chemical inducer of in vivo reactivation of herpes simplex virus type 1 in the ocular mouse model. *J Virol* **2007**;81(11):6106-10.
112. Sawtell NM, Thompson RL. Comparison of herpes simplex virus reactivation in ganglia in vivo and in explants demonstrates quantitative and qualitative differences. *Journal of virology* **2004**;78(14):7784-94.
113. Wilson AC, Mohr I. A cultured affair: HSV latency and reactivation in neurons. *Trends in microbiology* **2012**;20(12):604-11.
114. Cavallero S, Huot N, Francelle L, Lomonte P, Naas T, Labetoulle M. Biological features of herpes simplex virus type 1 latency in mice according to experimental conditions and type of neurones. *Investigative ophthalmology & visual science* **2014**;55(12):7761-74.
115. Hill TJ, Field HJ, Blyth WA. Acute and recurrent infection with herpes simplex virus in the mouse: a model for studying latency and recurrent disease. *The Journal of general virology* **1975**;28(3):341-53.
116. Labetoulle M, Kucera P, Ugolini G, et al. Neuronal propagation of HSV1 from the oral mucosa to the eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2000**;41(9):2600-6.
117. Hill TJ, Yirrell DL, Blyth WA. Infection of the adrenal gland as a route to the central nervous system after viraemia with herpes simplex virus in the mouse. *The Journal of general virology* **1986**;67 ( Pt 2):309-20.
118. Renis HE, Eidson EE, Mathews J, Gray JE. Pathogenesis of herpes simplex virus types 1 and 2 in mice after various routes of inoculation. *Infection and immunity* **1976**;14(2):571-8.
119. Wildy P. The progression of herpes simplex virus to the central nervous system of the mouse. *The Journal of hygiene* **1967**;65(2):173-92.
120. Labetoulle M, Mailliet S, Efstathiou S, Dezelee S, Frau E, Lafay F. HSV1 latency sites after inoculation in the lip: assessment of their localization and connections to the eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2003**;44(1):217-25.
121. Drane P, Ouarrhni K, Depaux A, Shuaib M, Hamiche A. The death-associated protein DAXX is a novel histone chaperone involved in the replication-independent deposition of H3.3. *Genes & development* **2010**;24(12):1253-65.
122. Catez F, Picard C, Held K, et al. HSV-1 genome subnuclear positioning and associations with host-cell PML-NBs and centromeres regulate LAT locus transcription during latency in neurons. *PLoS Pathog* **2012**;8(8):e1002852.
123. Cohen C, Corpet A, Roubille S, et al. Promyelocytic leukemia (PML) nuclear bodies (NBs) induce latent/quiescent HSV-1 genomes chromatinization through a PML NB/Histone H3.3/H3.3 Chaperone Axis. *PLoS Pathog* **2018**;14(9):e1007313.
124. Maroui MA, Calle A, Cohen C, et al. Latency Entry of Herpes Simplex Virus 1 Is Determined by the Interaction of Its Genome with the Nuclear Environment. *PLoS Pathog* **2016**;12(9):e1005834.
125. Dai HS, Caligiuri MA. Molecular Basis for the Recognition of Herpes Simplex Virus Type 1 Infection by Human Natural Killer Cells. *Frontiers in immunology* **2018**;9:183.
126. Zhang SY, Casanova JL. Inborn errors underlying herpes simplex encephalitis: From TLR3 to IRF3. *The Journal of experimental medicine* **2015**;212(9):1342-3.
127. Ma Y, He B. Recognition of herpes simplex viruses: toll-like receptors and beyond. *Journal of molecular biology* **2014**;426(6):1133-47.
128. Melchjorsen J. Sensing herpes: more than toll. *Reviews in medical virology* **2012**;22(2):106-21.
129. Lima GK, Zolini GP, Mansur DS, et al. Toll-like receptor (TLR) 2 and TLR9 expressed in trigeminal ganglia are critical to viral control during herpes simplex virus 1 infection. *Am J Pathol* **2010**;177(5):2433-45.
130. Reinert LS, Lopusna K, Winther H, et al. Sensing of HSV-1 by the cGAS-STING pathway in microglia orchestrates antiviral defence in the CNS. *Nature communications* **2016**;7:13348.
131. Alandijany T, Roberts APE, Conn KL, et al. Distinct temporal roles for the promyelocytic





- leukaemia (PML) protein in the sequential regulation of intracellular host immunity to HSV-1 infection. *PLoS Pathog* **2018**;14(1):e1006769.
132. Li J, Hu S, Zhou L, et al. Interferon lambda inhibits herpes simplex virus type I infection of human astrocytes and neurons. *Glia* **2011**;59(1):58-67.
  133. Cantin E, Tanamachi B, Openshaw H. Role for gamma interferon in control of herpes simplex virus type 1 reactivation. *J Virol* **1999**;73(4):3418-23.
  134. Sainz B, Jr., Halford WP. Alpha/Beta interferon and gamma interferon synergize to inhibit the replication of herpes simplex virus type 1. *J Virol* **2002**;76(22):11541-50.
  135. Kajita AI, Morizane S, Takiguchi T, Yamamoto T, Yamada M, Iwatsuki K. Interferon-Gamma Enhances TLR3 Expression and Anti-Viral Activity in Keratinocytes. *The Journal of investigative dermatology* **2015**;135(8):2005-11.
  136. Chelbi-Alix MK, Pelicano L, Quignon F, et al. Induction of the PML protein by interferons in normal and APL cells. *Leukemia* **1995**;9(12):2027-33.
  137. Merkl PE, Orzalli MH, Knipe DM. Mechanisms of Host IFI16, PML, and Daxx Protein Restriction of Herpes Simplex Virus 1 Replication. *J Virol* **2018**;92(10).
  138. Maucourant C, Petitdemange C, Yssel H, Vieillard V. Control of Acute Arboviral Infection by Natural Killer Cells. *Viruses* **2019**;11(2).
  139. Yu YR, O'Koren EG, Hotten DF, et al. A Protocol for the Comprehensive Flow Cytometric Analysis of Immune Cells in Normal and Inflamed Murine Non-Lymphoid Tissues. *PloS one* **2016**;11(3):e0150606.
  140. Orr MT, Lanier LL. Natural killer cell education and tolerance. *Cell* **2010**;142(6):847-56.
  141. Maghazachi AA. Role of chemokines in the biology of natural killer cells. *Current topics in microbiology and immunology* **2010**;341:37-58.
  142. Biron CA, Byron KS, Sullivan JL. Severe herpesvirus infections in an adolescent without natural killer cells. *N Engl J Med* **1989**;320(26):1731-5.
  143. Jawahar S, Moody C, Chan M, Finberg R, Geha R, Chatila T. Natural Killer (NK) cell deficiency associated with an epitope-deficient Fc receptor type IIIA (CD16-II). *Clinical and experimental immunology* **1996**;103(3):408-13.
  144. Reske A, Pollara G, Krummenacher C, Katz DR, Chain BM. Glycoprotein-dependent and TLR2-independent innate immune recognition of herpes simplex virus-1 by dendritic cells. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2008**;180(11):7525-36.
  145. Leoni V, Gianni T, Salvioli S, Campadelli-Fiume G. Herpes simplex virus glycoproteins gH/gL and gB bind Toll-like receptor 2, and soluble gH/gL is sufficient to activate NF-kappaB. *J Virol* **2012**;86(12):6555-62.
  146. Ahn K, Meyer TH, Uebel S, et al. Molecular mechanism and species specificity of TAP inhibition by herpes simplex virus ICP47. *The EMBO journal* **1996**;15(13):3247-55.
  147. Dai HS, Griffin N, Bolyard C, et al. The Fc Domain of Immunoglobulin Is Sufficient to Bridge NK Cells with Virally Infected Cells. *Immunity* **2017**;47(1):159-70.e10.
  148. Deback C, Rousseau A, Breckler M, et al. Antiviral effects of Cacicol((R)), a heparan sulfate biomimetic for corneal regeneration therapy, for herpes simplex virus type-1 and varicella zoster virus infection. *Antiviral therapy* **2018**;23(8):665-75.
  149. Kim M, Osborne NR, Zeng W, et al. Herpes simplex virus antigens directly activate NK cells via TLR2, thus facilitating their presentation to CD4 T lymphocytes. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2012**;188(9):4158-70.
  150. Chakravarti A, Allaeyes I, Poubelle PE. [Neutrophils and immunity: is it innate or acquired?]. *Medicine sciences : M/S* **2007**;23(10):862-7.
  151. Odobasic D, Kitching AR, Holdsworth SR. Neutrophil-Mediated Regulation of Innate and Adaptive Immunity: The Role of Myeloperoxidase. *Journal of immunology research* **2016**;2016:2349817.
  152. Zheng M, Fields MA, Liu Y, Cathcart H, Richter E, Atherton SS. Neutrophils protect the retina of the injected eye from infection after anterior chamber inoculation of HSV-1 in BALB/c mice. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2008**;49(9):4018-25.
  153. Hayashi K, Hooper LC, Okuno T, Takada Y, Hooks JJ. Inhibition of HSV-1 by chemoattracted neutrophils: supernatants of corneal epithelial cells (HCE) and macrophages (THP-1) treated with virus components chemoattract neutrophils (PMN), and supernatants of PMN treated with these conditioned media inhibit viral growth. *Archives of virology*



- 2012**;157(7):1377-81.
154. Thomas J, Gangappa S, Kanangat S, Rouse BT. On the essential involvement of neutrophils in the immunopathologic disease: herpetic stromal keratitis. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **1997**;158(3):1383-91.
  155. Armién AG, Hu S, Little MR, et al. Chronic cortical and subcortical pathology with associated neurological deficits ensuing experimental herpes encephalitis. *Brain pathology* (Zurich, Switzerland) **2010**;20(4):738-50.
  156. Ramakrishna C, Cantin EM. IFN $\gamma$  inhibits G-CSF induced neutrophil expansion and invasion of the CNS to prevent viral encephalitis. *PLoS Pathog* **2018**;14(1):e1006822.
  157. Royer DJ, Zheng M, Conrady CD, Carr DJ. Granulocytes in Ocular HSV-1 Infection: Opposing Roles of Mast Cells and Neutrophils. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2015**;56(6):3763-75.
  158. Fabre V, Beiting DP, Bliss SK, et al. Eosinophil deficiency compromises parasite survival in chronic nematode infection. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2009**;182(3):1577-83.
  159. Borkar DS, Gonzales JA, Tham VM, et al. Association between atopy and herpetic eye disease: results from the pacific ocular inflammation study. *JAMA ophthalmology* **2014**;132(3):326-31.
  160. Rezende RA, Bisol T, Hammersmith K, et al. Efficacy of oral antiviral prophylaxis in preventing ocular herpes simplex virus recurrences in patients with and without self-reported atopy. *American journal of ophthalmology* **2006**;142(4):563-7.
  161. Ong PY, Leung DY. Bacterial and Viral Infections in Atopic Dermatitis: a Comprehensive Review. *Clinical reviews in allergy & immunology* **2016**;51(3):329-37.
  162. Doutlik S, Kutinova L, Benda R, et al. Some immunological characteristics of subjects suffering from frequent herpes simplex virus recurrences. *Acta virologica* **1989**;33(5):435-46.
  163. Melroe GT, Silva L, Schaffer PA, Knipe DM. Recruitment of activated IRF-3 and CBP/p300 to herpes simplex virus ICP0 nuclear foci: Potential role in blocking IFN- $\beta$  induction. *Virology* **2007**;360(2):305-21.
  164. Everett RD, Freemont P, Saitoh H, et al. The disruption of ND10 during herpes simplex virus infection correlates with the Vmw110- and proteasome-dependent loss of several PML isoforms. *J Virol* **1998**;72(8):6581-91.
  165. Boutell C, Sadis S, Everett RD. Herpes simplex virus type 1 immediate-early protein ICP0 and its isolated RING finger domain act as ubiquitin E3 ligases in vitro. *J Virol* **2002**;76(2):841-50.
  166. Lium EK, Silverstein S. Mutational analysis of the herpes simplex virus type 1 ICP0 C3HC4 zinc ring finger reveals a requirement for ICP0 in the expression of the essential alpha27 gene. *J Virol* **1997**;71(11):8602-14.
  167. Melchjorsen J, Siren J, Julkunen I, Paludan SR, Matikainen S. Induction of cytokine expression by herpes simplex virus in human monocyte-derived macrophages and dendritic cells is dependent on virus replication and is counteracted by ICP27 targeting NF- $\kappa$ B and IRF-3. *The Journal of general virology* **2006**;87(Pt 5):1099-108.
  168. Johnson KE, Song B, Knipe DM. Role for herpes simplex virus 1 ICP27 in the inhibition of type I interferon signaling. *Virology* **2008**;374(2):487-94.
  169. Paladino P, Mossman KL. Mechanisms employed by herpes simplex virus 1 to inhibit the interferon response. *Journal of interferon & cytokine research : the official journal of the International Society for Interferon and Cytokine Research* **2009**;29(9):599-607.
  170. Huang J, You H, Su C, Li Y, Chen S, Zheng C. Herpes Simplex Virus 1 Tegument Protein VP22 Abrogates cGAS/STING-Mediated Antiviral Innate Immunity. *J Virol* **2018**;92(15).
  171. Su C, Zheng C. Herpes Simplex Virus 1 Abrogates the cGAS/STING-Mediated Cytosolic DNA-Sensing Pathway via Its Virion Host Shutoff Protein, UL41. *J Virol* **2017**;91(6).
  172. Ginhoux F, Williams M. Tissue-Resident Macrophage Ontogeny and Homeostasis. *Immunity* **2016**;44(3):439-49.
  173. Jakubzick CV, Randolph GJ, Henson PM. Monocyte differentiation and antigen-presenting functions. *Nature reviews. Immunology* **2017**;17(6):349-62.
  174. Mott K, Brick DJ, van Rooijen N, Ghiasi H. Macrophages are important determinants of acute ocular HSV-1 infection in immunized mice. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2007**;48(12):5605-15.
  175. Cathcart HM, Fields MA, Zheng M, Marshall B, Atherton SS. Infiltrating cells and IFN $\gamma$  production in the injected eye after unioocular anterior chamber inoculation of HSV-1. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2009**;50(5):2269-75.



176. Lee DH, Ghiasi H. Roles of M1 and M2 Macrophages in Herpes Simplex Virus 1 Infectivity. *J Virol* **2017**;91(15).
177. Carr DJJ. Herpes Simplex Virus 1, Macrophages, and the Cornea. *J Virol* **2017**;91(21).
178. Jeon S, Rowe AM, Carroll KL, Harvey SAK, Hendricks RL. PD-L1/B7-H1 Inhibits Viral Clearance by Macrophages in HSV-1-Infected Corneas. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2018**;200(11):3711-19.
179. Segura E, Amigorena S. [Inflammatory dendritic cells]. *Medecine sciences : M/S* **2014**;30(1):64-8.
180. Breton G. [Origin and development of human dendritic cells]. *Medecine sciences : M/S* **2015**;31(8-9):725-7.
181. Schuster P, Boscheinen JB, Tennert K, Schmidt B. The Role of Plasmacytoid Dendritic Cells in Innate and Adaptive Immune Responses against Alpha Herpes Virus Infections. *Advances in virology* **2011**;2011:679271.
182. Hochrein H, Schlatter B, O'Keeffe M, et al. Herpes simplex virus type-1 induces IFN-alpha production via Toll-like receptor 9-dependent and -independent pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2004**;101(31):11416-21.
183. Pollara G, Jones M, Handley ME, et al. Herpes simplex virus type-1-induced activation of myeloid dendritic cells: the roles of virus cell interaction and paracrine type I IFN secretion. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2004**;173(6):4108-19.
184. Bosnjak L, Miranda-Saksena M, Koelle DM, Boadle RA, Jones CA, Cunningham AL. Herpes simplex virus infection of human dendritic cells induces apoptosis and allows cross-presentation via uninfected dendritic cells. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2005**;174(4):2220-7.
185. Allan RS, Waithman J, Bedoui S, et al. Migratory dendritic cells transfer antigen to a lymph node-resident dendritic cell population for efficient CTL priming. *Immunity* **2006**;25(1):153-62.
186. Kassim SH, Rajasagi NK, Zhao X, Chervenak R, Jennings SR. In vivo ablation of CD11c-positive dendritic cells increases susceptibility to herpes simplex virus type 1 infection and diminishes NK and T-cell responses. *J Virol* **2006**;80(8):3985-93.
187. Kittan NA, Bergua A, Haupt S, et al. Impaired plasmacytoid dendritic cell innate immune responses in patients with herpes virus-associated acute retinal necrosis. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2007**;179(6):4219-30.
188. Lee HK, Zamora M, Linehan MM, et al. Differential roles of migratory and resident DCs in T cell priming after mucosal or skin HSV-1 infection. *The Journal of experimental medicine* **2009**;206(2):359-70.
189. Eis-Hubinger AM, Schmidt DS, Schneeweis KE. Anti-glycoprotein B monoclonal antibody protects T cell-depleted mice against herpes simplex virus infection by inhibition of virus replication at the inoculated mucous membranes. *The Journal of general virology* **1993**;74 ( Pt 3):379-85.
190. Mancuso R, Baglio F, Cabinio M, et al. Titers of herpes simplex virus type 1 antibodies positively correlate with grey matter volumes in Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's disease : JAD* **2014**;38(4):741-5.
191. Deshpande SP, Zheng M, Daheshia M, Rouse BT. Pathogenesis of herpes simplex virus-induced ocular immunoinflammatory lesions in B-cell-deficient mice. *J Virol* **2000**;74(8):3517-24.
192. Royer DJ, Carr MM, Gurung HR, Halford WP, Carr DJJ. The Neonatal Fc Receptor and Complement Fixation Facilitate Prophylactic Vaccine-Mediated Humoral Protection against Viral Infection in the Ocular Mucosa. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2017**;199(5):1898-911.
193. Royer DJ, Gurung HR, Jinkins JK, et al. A Highly Efficacious Herpes Simplex Virus 1 Vaccine Blocks Viral Pathogenesis and Prevents Corneal Immunopathology via Humoral Immunity. *J Virol* **2016**;90(11):5514-29.
194. Coles RM, Mueller SN, Heath WR, Carbone FR, Brooks AG. Progression of armed CTL from draining lymph node to spleen shortly after localized infection with herpes simplex virus 1. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)* **2002**;168(2):834-8.
195. van Lint A, Ayers M, Brooks AG, Coles RM, Heath WR, Carbone FR. Herpes simplex



- virus-specific CD8+ T cells can clear established lytic infections from skin and nerves and can partially limit the early spread of virus after cutaneous inoculation. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2004**;172(1):392-7.
196. Shimeld C, Whiteland JL, Nicholls SM, et al. Immune cell infiltration and persistence in the mouse trigeminal ganglion after infection of the cornea with herpes simplex virus type 1. *J Neuroimmunol* **1995**;61(1):7-16.
  197. Derfuss T, Segerer S, Herberger S, et al. Presence of HSV-1 immediate early genes and clonally expanded T-cells with a memory effector phenotype in human trigeminal ganglia. *Brain pathology* (Zurich, Switzerland) **2007**;17(4):389-98.
  198. Knickelbein JE, Khanna KM, Yee MB, Baty CJ, Kinchington PR, Hendricks RL. Noncytotoxic lytic granule-mediated CD8+ T cell inhibition of HSV-1 reactivation from neuronal latency. *Science* **2008**;322(5899):268-71.
  199. Himmelein S, Lindemann A, Sinicina I, Strupp M, Brandt T, Hufner K. Latent herpes simplex virus 1 infection does not induce apoptosis in human trigeminal Ganglia. *J Virol* **2015**;89(10):5747-50.
  200. Jenkins MR, Rudd-Schmidt JA, Lopez JA, et al. Failed CTL/NK cell killing and cytokine hypersecretion are directly linked through prolonged synapse time. *The Journal of experimental medicine* **2015**;212(3):307-17.
  201. Khan AA, Srivastava R, Spencer D, et al. Phenotypic and functional characterization of herpes simplex virus glycoprotein B epitope-specific effector and memory CD8+ T cells from symptomatic and asymptomatic individuals with ocular herpes. *J Virol* **2015**;89(7):3776-92.
  202. Jeon S, St Leger AJ, Cherpes TL, Sheridan BS, Hendricks RL. PD-L1/B7-H1 regulates the survival but not the function of CD8+ T cells in herpes simplex virus type 1 latently infected trigeminal ganglia. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2013**;190(12):6277-86.
  203. Hill A, Jugovic P, York I, et al. Herpes simplex virus turns off the TAP to evade host immunity. *Nature* **1995**;375(6530):411-5.
  204. Barcy S, Corey L. Herpes simplex inhibits the capacity of lymphoblastoid B cell lines to stimulate CD4+ T cells. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2001**;166(10):6242-9.
  205. Koyanagi N, Imai T, Shindo K, et al. Herpes simplex virus-1 evasion of CD8+ T cell accumulation contributes to viral encephalitis. *The Journal of clinical investigation* **2017**;127(10):3784-95.
  206. Arvin AM. Varicella vaccine: genesis, efficacy, and attenuation. *Virology* **2001**;284(2):153-8.
  207. Tillieux SL, Halsey WS, Thomas ES, Voycik JJ, Sathe GM, Vassilev V. Complete DNA sequences of two oka strain varicella-zoster virus genomes. *J Virol* **2008**;82(22):11023-44.
  208. Vazquez M, LaRussa PS, Gershon AA, et al. Effectiveness over time of varicella vaccine. *Jama* **2004**;291(7):851-5.
  209. Marin M, Marti M, Kambhampati A, Jeram SM, Seward JF. Global Varicella Vaccine Effectiveness: A Meta-analysis. *Pediatrics* **2016**;137(3):e20153741.
  210. Gilbert PB, Gabriel EE, Miao X, et al. Fold rise in antibody titers by measured by glycoprotein-based enzyme-linked immunosorbent assay is an excellent correlate of protection for a herpes zoster vaccine, demonstrated via the vaccine efficacy curve. *J Infect Dis* **2014**;210(10):1573-81.
  211. Gilbert PB, Luedtke AR. Statistical Learning Methods to Determine Immune Correlates of Herpes Zoster in Vaccine Efficacy Trials. *J Infect Dis* **2018**;218(suppl\_2):S99-s101.
  212. Qi Q, Cavanagh MM, Le Saux S, et al. Defective T Memory Cell Differentiation after Varicella Zoster Vaccination in Older Individuals. *PLoS Pathog* **2016**;12(10):e1005892.
  213. Weinberg A, Pang L, Johnson MJ, et al. The Effect of Age on the Immunogenicity of the Live Attenuated Zoster Vaccine Is Predicted by Baseline Regulatory T Cells and VZV-Specific T Cell Immunity. *J Virol* **2019**.
  214. Oxman MN, Levin MJ, Johnson GR, et al. A vaccine to prevent herpes zoster and postherpetic neuralgia in older adults. *N Engl J Med* **2005**;352(22):2271-84.
  215. Willis ED, Woodward M, Brown E, et al. Herpes zoster vaccine live: A 10year review of post-marketing safety experience. *Vaccine* **2017**;35(52):7231-39.
  216. Morrison VA, Johnson GR, Schmader KE, et al. Long-term persistence of zoster vaccine efficacy. *Clin Infect Dis* **2015**;60(6):900-9.
  217. Heineman TC, Cunningham A, Levin M. Understanding the immunology of Shingrix, a



- recombinant glycoprotein E adjuvanted herpes zoster vaccine. *Current opinion in immunology* **2019**;59:42-48.
218. CDC Shingles vaccination. Secondary CDC Shingles vaccination 2018. <https://www.cdc.gov/shingles/vaccination.html>.
  219. Stanberry LR, Cunningham AL, Mindel A, et al. Prospects for control of herpes simplex virus disease through immunization. *Clin Infect Dis* **2000**;30(3):549-66.
  220. Corey L, Langenberg AG, Ashley R, et al. Recombinant glycoprotein vaccine for the prevention of genital HSV-2 infection: two randomized controlled trials. Chiron HSV Vaccine Study Group. *Jama* **1999**;282(4):331-40.
  221. Stanberry LR, Spruance SL, Cunningham AL, et al. Glycoprotein-D-adjuvant vaccine to prevent genital herpes. *N Engl J Med* **2002**;347(21):1652-61.
  222. Straus SE, Wald A, Kost RG, et al. Immunotherapy of recurrent genital herpes with recombinant herpes simplex virus type 2 glycoproteins D and B: results of a placebo-controlled vaccine trial. *J Infect Dis* **1997**;176(5):1129-34.
  223. Nguyen LH, Knipe DM, Finberg RW. Replication-defective mutants of herpes simplex virus (HSV) induce cellular immunity and protect against lethal HSV infection. *J Virol* **1992**;66(12):7067-72.
  224. Hoshino Y, Pesnicak L, Dowdell KC, et al. Comparison of immunogenicity and protective efficacy of genital herpes vaccine candidates herpes simplex virus 2 dl5-29 and dl5-29-41L in mice and guinea pigs. *Vaccine* **2008**;26(32):4034-40.
  225. Yao F, Eriksson E. A novel anti-herpes simplex virus type 1-specific herpes simplex virus type 1 recombinant. *Human gene therapy* **1999**;10(11):1811-8.
  226. Augustinova H, Hoeller D, Yao F. The dominant-negative herpes simplex virus type 1 (HSV-1) recombinant CJ83193 can serve as an effective vaccine against wild-type HSV-1 infection in mice. *J Virol* **2004**;78(11):5756-65.
  227. Brans R, Akhrameyeva NV, Yao F. Prevention of genital herpes simplex virus type 1 and 2 disease in mice immunized with a gD-expressing dominant-negative recombinant HSV-1. *The Journal of investigative dermatology* **2009**;129(10):2470-9.
  228. Brans R, Yao F. Immunization with a dominant-negative recombinant Herpes Simplex Virus (HSV) type 1 protects against HSV-2 genital disease in guinea pigs. *BMC microbiology* **2010**;10:163.
  229. Lu Z, Brans R, Akhrameyeva NV, Murakami N, Xu X, Yao F. High-level expression of glycoprotein D by a dominant-negative HSV-1 virus augments its efficacy as a vaccine against HSV-1 infection. *The Journal of investigative dermatology* **2009**;129(5):1174-84.
  230. Brans R, Eriksson E, Yao F. Immunization with a dominant-negative recombinant HSV type 1 protects against HSV-1 skin disease in guinea pigs. *The Journal of investigative dermatology* **2008**;128(12):2825-32.
  231. Iyer AV, Pahar B, Chouljenko VN, Walker JD, Stanfield B, Kousoulas KG. Single dose of glycoprotein K (gK)-deleted HSV-1 live-attenuated virus protects mice against lethal vaginal challenge with HSV-1 and HSV-2 and induces lasting T cell memory immune responses. *Virol J* **2013**;10:317.
  232. Farrell HE, McLean CS, Harley C, Efstathiou S, Inglis S, Minson AC. Vaccine potential of a herpes simplex virus type 1 mutant with an essential glycoprotein deleted. *J Virol* **1994**;68(2):927-32.
  233. de Bruyn G, Vargas-Cortez M, Warren T, et al. A randomized controlled trial of a replication defective (gH deletion) herpes simplex virus vaccine for the treatment of recurrent genital herpes among immunocompetent subjects. *Vaccine* **2006**;24(7):914-20.
  234. Halford WP, Puschel R, Gershburg E, Wilber A, Gershburg S, Rakowski B. A live-attenuated HSV-2 ICP0 virus elicits 10 to 100 times greater protection against genital herpes than a glycoprotein D subunit vaccine. *PloS one* **2011**;6(3):e17748.
  235. Brittle EE, Wang F, Lubinski JM, Bunte RM, Friedman HM. A replication-competent, neuronal spread-defective, live attenuated herpes simplex virus type 1 vaccine. *J Virol* **2008**;82(17):8431-41.
  236. Coen DM, Kosz-Vnenchak M, Jacobson JG, et al. Thymidine kinase-negative herpes simplex virus mutants establish latency in mouse trigeminal ganglia but do not reactivate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*



- 1989;86(12):4736-40.
237. Efsthathiou S, Kemp S, Darby G, Minson AC. The role of herpes simplex virus type 1 thymidine kinase in pathogenesis. *The Journal of general virology* **1989**;70 ( Pt 4):869-79.
  238. Montgomery RI, Warner MS, Lum BJ, Spear PG. Herpes simplex virus-1 entry into cells mediated by a novel member of the TNF/NGF receptor family. *Cell* **1996**;87(3):427-36.
  239. Chew T, Noyce R, Collins SE, Hancock MH, Mossman KL. Characterization of the interferon regulatory factor 3-mediated antiviral response in a cell line deficient for IFN production. *Molecular immunology* **2009**;46(3):393-9.
  240. Ammerman NC, Beier-Sexton M, Azad AF. Growth and maintenance of Vero cell lines. *Current protocols in microbiology* **2008**;Appendix 4:Appendix 4E.
  241. Gelderblom M, Leyboldt F, Steinbach K, et al. Temporal and spatial dynamics of cerebral immune cell accumulation in stroke. *Stroke* **2009**;40(5):1849-57.
  242. Legroux L, Pittet CL, Beauseigle D, Deblois G, Prat A, Arbour N. An optimized method to process mouse CNS to simultaneously analyze neural cells and leukocytes by flow cytometry. *J Neurosci Methods* **2015**;247:23-31.
  243. R: A Language and Environment for Statistical Computing [program]: Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2011.
  244. Poccardi N, Rousseau A, Haigh O, et al. The kinetics of primary herpetic infection in ipsilateral and contralateral TGs determine the nature of HSV-1 acute infection and reactivation. submitted **2019**.
  245. Gebhardt T, Mueller SN, Heath WR, Carbone FR. Peripheral tissue surveillance and residency by memory T cells. *Trends in immunology* **2013**;34(1):27-32.
  246. Canivet C, Uyar O, Rheaume C, Piret J, Boivin G. The recruitment of peripheral blood leukocytes to the brain is delayed in susceptible BALB/c compared to resistant C57BL/6 mice during herpes simplex virus encephalitis. *Journal of neurovirology* **2019**;25(3):372-83.
  247. Gianni T, Leoni V, Campadelli-Fiume G. Type I interferon and NF-kappaB activation elicited by herpes simplex virus gH/gL via alphavbeta3 integrin in epithelial and neuronal cell lines. *J Virol* **2013**;87(24):13911-6.
  248. Sokol CL, Luster AD. The chemokine system in innate immunity. *Cold Spring Harbor perspectives in biology* **2015**;7(5).
  249. Megjugorac NJ, Young HA, Amrute SB, Olshalsky SL, Fitzgerald-Bocarsly P. Virally stimulated plasmacytoid dendritic cells produce chemokines and induce migration of T and NK cells. *Journal of leukocyte biology* **2004**;75(3):504-14.
  250. Soby S, Laursen RR, Ostergaard L, Melchjorsen J. HSV-1-induced chemokine expression via IFI16-dependent and IFI16-independent pathways in human monocyte-derived macrophages. *Herpesviridae* **2012**;3(1):6.
  251. Molesworth-Kenyon SJ, Milam A, Rockette A, Troupe A, Oakes JE, Lausch RN. Expression, Inducers and Cellular Sources of the Chemokine MIG (CXCL 9), During Primary Herpes Simplex Virus Type-1 Infection of the Cornea. *Curr Eye Res* **2015**;40(8):800-8.
  252. Tumpey TM, Cheng H, Yan XT, Oakes JE, Lausch RN. Chemokine synthesis in the HSV-1-infected cornea and its suppression by interleukin-10. *Journal of leukocyte biology* **1998**;63(4):486-92.
  253. Ugolini G. Transneuronal transfer of herpes simplex virus type 1 (HSV 1) from mixed limb nerves to the CNS. I. Sequence of transfer from sensory, motor, and sympathetic nerve fibres to the spinal cord. *J Comp Neurol* **1992**;326(4):527-48.
  254. Brazil JC, Quiros M, Nusrat A, Parkos CA. Innate immune cell-epithelial crosstalk during wound repair. *The Journal of clinical investigation* **2019**;130.
  255. Kosz-Vnenchak M, Coen DM, Knipe DM. Restricted expression of herpes simplex virus lytic genes during establishment of latent infection by thymidine kinase-negative mutant viruses. *J Virol* **1990**;64(11):5396-402.
  256. Lucinda N, Figueiredo MM, Pessoa NL, et al. Dendritic cells, macrophages, NK and CD8(+) T lymphocytes play pivotal roles in controlling HSV-1 in the trigeminal ganglia by producing IL1-beta, iNOS and granzyme B. *Virol J* **2017**;14(1):37.
  257. Conrady CD, Zheng M, Mandal NA, van Rooijen N, Carr DJ. IFN-alpha-driven CCL2 production recruits inflammatory monocytes to infection site in mice. *Mucosal Immunol* **2013**;6(1):45-55.
  258. Katsumoto A, Lu H, Miranda AS, Ransohoff RM. Ontogeny and functions of central



- nervous system macrophages. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2014**;193(6):2615-21.
259. Menasria R, Canivet C, Piret J, Boivin G. Infiltration Pattern of Blood Monocytes into the Central Nervous System during Experimental Herpes Simplex Virus Encephalitis. *PLoS one* **2015**;10(12):e0145773.
260. Vogel K, Thomann S, Vogel B, Schuster P, Schmidt B. Both plasmacytoid dendritic cells and monocytes stimulate natural killer cells early during human herpes simplex virus type 1 infections. *Immunology* **2014**;143(4):588-600.
261. Chucair-Elliott AJ, Gurung HR, Carr MM, Carr DJJ. Colony Stimulating Factor-1 Receptor Expressing Cells Infiltrating the Cornea Control Corneal Nerve Degeneration in Response to HSV-1 Infection. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **2017**;58(11):4670-82.
262. Handfield C, Kwock J, MacLeod AS. Innate Antiviral Immunity in the Skin. *Trends in immunology* **2018**;39(4):328-40.
263. Levin C, Perrin H, Combadiere B. Tailored immunity by skin antigen-presenting cells. *Human vaccines & immunotherapeutics* **2015**;11(1):27-36.
264. Wojtasiak M, Pickett DL, Tate MD, et al. Depletion of Gr-1+, but not Ly6G+, immune cells exacerbates virus replication and disease in an intranasal model of herpes simplex virus type 1 infection. *The Journal of general virology* **2010**;91(Pt 9):2158-66.
265. Hor JL, Heath WR, Mueller SN. Neutrophils are dispensable in the modulation of T cell immunity against cutaneous HSV-1 infection. *Sci Rep* **2017**;7:41091.
266. Molesworth-Kenyon SJ, Popham N, Milam A, Oakes JE, Lausch RN. Resident Corneal Cells Communicate with Neutrophils Leading to the Production of IP-10 during the Primary Inflammatory Response to HSV-1 Infection. *Int J Inflam* **2012**;2012:810359.
267. Shen FH, Wang SW, Yeh TM, Tung YY, Hsu SM, Chen SH. Absence of CXCL10 aggravates herpes stromal keratitis with reduced primary neutrophil influx in mice. *J Virol* **2013**;87(15):8502-10.
268. Foster EL, Simpson EL, Fredrikson LJ, et al. Eosinophils increase neuron branching in human and murine skin and in vitro. *PLoS one* **2011**;6(7):e22029.
269. Carmichael JC, Yokota H, Craven RC, Schmitt A, Wills JW. The HSV-1 mechanisms of cell-to-cell spread and fusion are critically dependent on host PTP1B. *PLoS Pathog* **2018**;14(5):e1007054.
270. Kim M, Truong NR, James V, et al. Relay of herpes simplex virus between Langerhans cells and dermal dendritic cells in human skin. *PLoS Pathog* **2015**;11(4):e1004812.
271. Whitney PG, Makhlof C, MacLeod B, et al. Effective Priming of Herpes Simplex Virus-Specific CD8(+) T Cells In Vivo Does Not Require Infected Dendritic Cells. *J Virol* **2018**;92(3).
272. Hain T, Melchior F, Kamenjarin N, et al. Dermal CD207-Negative Migratory Dendritic Cells Are Fully Competent to Prime Protective, Skin Homing Cytotoxic T-Lymphocyte Responses. *The Journal of investigative dermatology* **2019**;139(2):422-29.
273. Segura E, Amigorena S. Inflammatory dendritic cells in mice and humans. *Trends in immunology* **2013**;34(9):440-5.
274. van Velzen M, Laman JD, Kleinjan A, Poot A, Osterhaus AD, Verjans GM. Neuron-interacting satellite glial cells in human trigeminal ganglia have an APC phenotype. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2009**;183(4):2456-61.
275. Xu H, Manivannan A, Dawson R, et al. Differentiation to the CCR2+ inflammatory phenotype in vivo is a constitutive, time-limited property of blood monocytes and is independent of local inflammatory mediators. *Journal of immunology* (Baltimore, Md. : 1950) **2005**;175(10):6915-23.
276. Rosato PC, Leib DA. Neurons versus herpes simplex virus: the innate immune interactions that contribute to a host-pathogen standoff. *Future virology* **2015**;10(6):699-714.
277. Gill MB, Wright DE, Smith CM, May JS, Stevenson PG. Murid herpesvirus-4 lacking thymidine kinase reveals route-dependent requirements for host colonization. *The Journal of general virology* **2009**;90(Pt 6):1461-70.
278. Takashima A, Yao Y. Neutrophil plasticity: acquisition of phenotype and functionality of antigen-presenting cell. *Journal of leukocyte biology* **2015**;98(4):489-96.
279. Chen SH, Lin YW, Griffiths A, Huang WY, Chen SH. Competition and complementation between thymidine kinase-negative and wild-type herpes simplex virus during co-



- infection of mouse trigeminal ganglia. *The Journal of general virology* **2006**;87(Pt 12):3495-502.
280. Xie Y, Wu L, Wang M, et al. Alpha-Herpesvirus Thymidine Kinase Genes Mediate Viral Virulence and Are Potential Therapeutic Targets. *Frontiers in microbiology* **2019**;10:941.
281. Bacon TH, Levin MJ, Leary JJ, Sarisky RT, Sutton D. Herpes simplex virus resistance to acyclovir and penciclovir after two decades of antiviral therapy. *Clinical microbiology reviews* **2003**;16(1):114-28.
282. Burrel S, Aime C, Hermet L, Ait-Arkoub Z, Agut H, Boutolleau D. Surveillance of herpes simplex virus resistance to antivirals: a 4-year survey. *Antiviral research* **2013**;100(2):365-72.
283. Morfin F, Thouvenot D. Herpes simplex virus resistance to antiviral drugs. *Journal of clinical virology : the official publication of the Pan American Society for Clinical Virology* **2003**;26(1):29-37.
284. Melenhorst JJ, Scheinberg P, Chattopadhyay PK, et al. Detection of low avidity CD8(+) T cell populations with coreceptor-enhanced peptide-major histocompatibility complex class I tetramers. *Journal of immunological methods* **2008**;338(1-2):31-9.
285. Mildner A, Jung S. Development and function of dendritic cell subsets. *Immunity* **2014**;40(5):642-56.
286. Minoda Y, Virshup I, Leal Rojas I, et al. Human CD141(+) Dendritic Cell and CD1c(+) Dendritic Cell Undergo Concordant Early Genetic Programming after Activation in Humanized Mice In Vivo. *Frontiers in immunology* **2017**;8:1419.
287. Pasqual G, Chudnovskiy A, Tas JMJ, et al. Monitoring T cell-dendritic cell interactions in vivo by intercellular enzymatic labelling. *Nature* **2018**;553(7689):496-500.





## Annexes

**Article 1** : HSV-1 replication, ocular disease and reactivations from latency are restricted unilaterally after inoculation of virus into the lip.

(accepté dans Journal of Virology le 11/09/2019)



1 **HSV-1 replication, ocular disease and reactivations from latency are restricted**  
2 **unilaterally after inoculation of virus into the lip**

3  
4 Nolwenn Pocard, <sup>a</sup> Antoine Rousseau, <sup>a,b,c</sup> Oscar Haigh, <sup>b</sup> Julie Takissian, <sup>a,d</sup> Thierry  
5 Naas, <sup>d</sup> Claire Deback, <sup>e</sup> Louise Trouillaud, <sup>b</sup> Mohammad Issa, <sup>b</sup> Simon Roubille, <sup>g</sup>  
6 Franceline Juillard, <sup>g</sup> Stacey Efstathiou, <sup>f</sup> Patrick Lomonte, <sup>g</sup> Marc Labetoulle <sup>a,b,c,#</sup>

7 a) Institut de Biologie Intégrative de la Cellule (I2BC), Département de Virologie, CNRS,  
8 Gif-sur-Yvette, France.

9 b) CEA - Université Paris Sud, INSERM U1184, Immunology of Viral Infections and  
10 Autoimmune Diseases, IDMIT département, IBFJ, 92265, Fontenay-aux-Roses, France.

11 c) Université Paris Sud, Centre Hospitalier Universitaire de Bicêtre, Service  
12 d'Ophthalmologie, APHP, DHU Vision & Handicaps, Centre de référence maladies rares  
13 en ophtalmologie OPHTARA, Le Kremlin-Bicêtre, France.

14 d) Université Paris Sud, Centre Hospitalier Universitaire de Bicêtre, Service de  
15 Bactériologie, APHP, Le Kremlin-Bicêtre, France.

16 e) Université Paris Sud, Hôpital Paul Brousse, Service de Virologie, APHP, Villejuif,  
17 France.

18 f) Division of Virology, Department of Pathology, Tennis Court Road, Cambridge CB2  
19 1QP, UK

20 g) Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS UMR 5310, INSERM U 1217, LabEx  
21 DEVweCAN, Institut NeuroMyoGène (INMG), team Chromatin Assembly, Nuclear  
22 Domains, Virus. F-69100, Lyon, France

23  
24 **Running Title:** Altered kinetics of HSV-1 infection eliminates disease

25 **Total word count: 5797**

26 **Abstract word count: 257**

27  
28 **#Corresponding author:**

29 Marc Labetoulle, Service d'ophtalmologie, Hôpital de Bicêtre

30 78, rue du Général Leclerc, 94275 Le Kremlin Bicêtre

31 marc.labetoulle@aphp.fr

32 phone: +33 1 45 21 36 90, fax: +33 1 45 21 22 46

33 **Keywords:** HSV-1; latency; reactivation; trigeminal ganglion; neurons; superinfection;  
34 keratitis

35 **ABSTRACT**

36 Ocular herpes simplex keratitis (HSK) is a consequence of viral reactivations from  
37 trigeminal ganglia (TG) and occurs almost exclusively in the same eye in humans. In  
38 our murine oro-ocular (OO) model, HSV-1 inoculation in one side of the lip propagates  
39 virus to infect the ipsilateral TG. Replication here allows infection of the brainstem, and  
40 infection of the contralateral TG. Interestingly, HSK is observed in our OO model only  
41 from the eye ipsilateral to site of lip infection. Thus, unilateral restriction of HSV-1 may  
42 be due to differential kinetics of virus arrival in the ipsilateral versus contralateral TG.  
43 We inoculated mice with HSV-1 reporter viruses, and then superinfected them to  
44 monitor changes in acute and latent phase gene expression in TG after superinfection,  
45 compared to control (single inoculation). Delaying superinfection by 4 days after initial  
46 right lip inoculation elicited failed superinfecting-virus gene expression, and eliminated  
47 clinical signs of disease. Initial inoculation with a thymidine kinase-deficient HSV-1  
48 (TK<sub>del</sub>) completely abolished reactivation of WT superinfecting virus from TG during  
49 latent stage. In light of these seemingly failed infections, viral genome was detected in  
50 both TGs. Our data demonstrate that inoculation of HSV-1 in the lip propagates virus to  
51 both TG, but with delay in reaching the TG contralateral to the side of lip infection. This  
52 delay is responsible for restricting viral replication to the ipsilateral TG, which abrogates  
53 ocular disease and viral reactivations from the contralateral side. These observations  
54 may help to understand why HSK is observed unilaterally in humans, and provides  
55 insight into vaccine strategies to protect against HSK.

56

57

58

## 59 **IMPORTANCE**

60 Herpetic keratitis (HK) is the leading cause of blindness by an infectious agent in the  
61 developed world. This disease can occur after reactivation of Herpes simplex virus 1 in  
62 the trigeminal ganglia leading to dissemination of virus to, and infection of, the cornea.  
63 A clinical paradox is evidenced by the bilateral presence of latent viral genomes in both  
64 trigeminal ganglia, while for any given patient the disease is unilateral with recurrences  
65 in a single eye. Our study links the kinetics of early infection to unilateral disease  
66 phenomenon, and demonstrates protection against viral reactivation when kinetics are  
67 exploited. Our results have direct implications in the understanding of human disease  
68 pathogenesis, and immunotherapeutic strategies for the treatment of HK and viral  
69 reactivations.

70

## 71 **INTRODUCTION**

72 Herpes simplex virus type 1 (HSV-1) belongs to the *Herpesviridae* family, which  
73 are widespread in nature and have the characteristic feature of establishing lifelong  
74 latency in the infected host **(1)**. The unique natural host of HSV-1 is humans, in which  
75 primary infection occurs almost always via the oral mucosae **(2, 3)**. Subsequently, the  
76 nucleocapsid travels by retrograde axonal transport to neuronal cell bodies **(4)** located  
77 in the trigeminal ganglia (TG), where the virus establishes a latent infection. The main  
78 sites of HSV-1 latency are the TG, which drive sensitive innervation of the face **(5, 6)**,  
79 and where the viral genome is retained for the entirety of the hosts life **(7)**. Reactivations  
80 of these latent reservoirs can propagate infection of various ocular tissues, leading to  
81 ocular herpetic disease (OHD). The prevalence of OHD has been estimated at 150/100  
82 000 inhabitants in the US **(8)**, and the annual incidence ranges between 12 and 30 per

83 100 000 inhabitants **(8-10)**. Corneal recurrence of herpetic keratitis (HK) is the most  
84 common clinical presentation of OHD **(11)**. While some HK can resolve without further  
85 complications, the cumulative risk of one or more recurrences is greater than 60% in  
86 persons over 20 years old **(11)**. The risk of corneal opacities increases with the number  
87 of relapses. Hence, HK is a sight-threatening disease and 10-year follow-up has shown  
88 that visual acuity is below 20/200 in more than 10% of affected eyes **(10)**.

89

90 One of the most striking properties of HK is the unilateral nature of the  
91 recurrences in almost all patients **(6, 11)**, despite similar latent HSV-1 DNA loads in  
92 both the left and right TG **(5, 12, 13)**. This clinical-biological discordance suggests that  
93 the presence of viral genome in the TG is not a sufficient event for precipitating a  
94 reactivation event. Furthermore, different animal infection models and *in vitro* studies  
95 have confirmed that under conditions of sequential infection, immune (innate and  
96 adaptive) and HSV-1-mediated (superinfection exclusion) mechanisms influence the  
97 severity of acute phase clinical signs, and the establishment of latency by the  
98 superinfecting strains **(14-18)**. However, these mechanisms are unable to control the  
99 spread of superinfecting HSV-1 to neuronal ganglia, nor to prevent reactivations  
100 completely. These studies support the idea that reactivations of HSV-1 to cause  
101 recurrent disease are heavily influenced by the sequence of infection; where the primary  
102 virus infecting the host attenuates the infectivity of superinfections and their ability to  
103 reactivate from latency, while the primary virus retains its own ability to reactivate.

104

105 The profound unilateral reactivation phenomena of HK, in light of bilateral latent  
106 HSV-1 infection, begs the question of how a primary infection can influence outcomes of

107 viral superinfection of the neuronal network. To explore these concepts, and to  
108 investigate how acute phase and virus latent state (linked to HK) were affected by  
109 infection kinetics, we took advantage of a well-defined mouse model of oral-ocular (OO)  
110 HSV-1 infection **(19-22)**, which mimics several of the key aspects of OHD in humans.  
111 After precise primary inoculation into the oral tissue segregated to the left side of the  
112 upper lip, the ipsilateral TG (left) supports active virus replication from 4 days after  
113 primary infection and acute keratitis occurs in the ipsilateral eye from 6 days post  
114 infection (DPI). During this time the virus also reaches the contralateral TG (right side),  
115 although there is no infection of the right eye. Once acute phase of the infection has  
116 resolved, HSV-1 latency is detectable in both TG from 28 DPI. While the latent HSV-1  
117 DNA load is similar in both TG **(22)**, as described in humans **(5, 12, 13)**, neurons  
118 expressing high levels of LAT are almost exclusively detected in the TG ipsilateral to the  
119 lip inoculation site **(21, 22)**. We have observed that reactivation from latency occurred  
120 almost exclusively from one TG, the TG ipsilateral to inoculation, mimicking the  
121 unilateral nature of HK in humans **(6)**.

122

123         We hypothesized that unilateral viral reactivation in animals and the ocular  
124 disease patterns in humans could be related to the triggering of early events, induced  
125 during or just after the inoculation process, that eventually dictate the long-term  
126 establishment of latency and unilateral reactivation. We explored this idea using a dual  
127 inoculation procedure, where HSV-1 reporter viruses were inoculated into the right  
128 upper lip of mice to initiate viral infection, while virulent wild type virus was inoculated  
129 into the contralateral lip with delay. This study allowed us to determine how altered

130 HSV-1 infection kinetics would influence superinfecting virus acute phase, viral  
131 dissemination, and latency establishment.

132

## 133 **RESULTS**

### 134 **Unilateral lip inoculation of wild-type HSV-1 SC16 results in unilateral reactivation**

135 **in mice.** HSV-1 inoculation in the oral ocular (OO) model occurs in the upper lip, and is

136 localized to the center of one side, at the muco-cutaneous border. After acute phase

137 replication in the lip, the virus disseminates to both left and right TG, as previously

138 demonstrated by an abundance of viral DNA and bilateral transcription of ICP0 and LAT

139 mRNA (**21, 22**). To demonstrate unilateral HSV-1 reactivation phenomenon, mice (*n*

140 =14) were inoculated in the left lip with wild-type SC16 virus. Most animals (12/14)

141 survived the acute phase of infection and were sacrificed at 28 DPI. TGs were

142 harvested and HSV-1 reactivation from individual TGs was induced by *ex vivo* culture.

143 Infectious virus particles were generated from 50% of ipsilateral (left) TG cultures, while

144 no contralateral (right) TG cultures generated infectious virus (**Figure 1A**) A second

145 group of mice (*n* = 5) infected via the same process were also harvested at 28 DPI, and

146 HSV-1 genomes were detected by qPCR targeting gG coding sequence (**Figure 1B**).

147 HSV-1 DNA was detected in abundance in all TG, with no significant difference between

148 HSV-1 DNA detected in left or right TG. This data demonstrates that after lip infection

149 restricted to one side, HSV-1 is propagated to both left and right TG. However, HSV-1

150 reactivations from latency occur unilaterally from the TG ipsilateral to HSV-1 inoculation.

151

### 152 **Delayed kinetics of infection block the transcriptional activity of superinfecting**

153 **virus in the ipsilateral TG.** To further characterize the phenomenon of unilateral HSV-

154 1 reactivation from the ipsilateral TG, we questioned whether the naturally delayed  
155 kinetics of viral arrival to the TGs after lip infection (i.e. 4 DPI in TG ipsilateral and 6 DPI  
156 in TG contralateral to infection (**19**)) was involved in restricting virus reactivation to the  
157 ipsilateral TG. To explore this concept, we performed an initial virus inoculation in the  
158 right lip with followed by superinfection in the left lip. The superinfecting left lip  
159 inoculations were performed in different groups of mice on different days, so that  
160 superinfecting virus would disseminate to the ipsilateral (left) TG at delayed time points  
161 in relation to the initial infection on day 0 (**Figure 2A**). The right side infection aimed to  
162 produce day 4 right TG and day 6 left TG infection kinetics, while the delays in  
163 superinfection of the left lip would achieve infection of the left TG before, during, or after  
164 this 4 - 6 day window. To distinguish the initial infecting virus from superinfecting virus,  
165 we utilized reporter viruses all derived from the SC16 parent strain: gJ-GFP for the initial  
166 right-side inoculation, and gJ-LacZ for superinfection in the left-side. We previously  
167 observed that mice infected with gJ-GFP lack signs of clinical morbidity (no death or  
168 ocular signs) during the first 10 days after inoculation, despite the presence of  
169 replicating particles in the TG at day 4 after inoculation albeit to a much lesser extent  
170 than with wild-type SC16 (*unpublished observations*).

171

172 A group of mice ( $n = 24$ ) were inoculated with gJ-GFP in the right lip. Between zero to 6  
173 days later, subgroups of mice ( $n = 3$ ) were superinfected with gJ-LacZ in the left lip. Left  
174 and right TG were harvested from these animals that were sacrificed 6 DPSI, and fixed  
175 sections were analyzed for superinfecting virus gJ-LacZ reporter gene activity by  
176 enumeration of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons in both TGs (**Figure 2B**). In the absence of  
177 an initial inoculation, or when superinfection was performed up to 3 days after initial



178 inoculation,  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were frequently observed in left (ipsilateral to  
179 superinfection) TGs (11/12). Under all conditions, and in the vast majority of mice  
180 (22/24), no  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons could be detected in the TG contralateral to  
181 superinfection (right TG). Strikingly, no  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons could be detected in  
182 either the left or right TG from all mice that were superinfected at 4 DPI (9/9), and  
183 beyond (highlighted by bracket). These data demonstrated that any delay between  
184 initial infection and contralateral superinfection in the lips leads to a reduction in the  
185 numbers of cells harboring viral replication in the TG ipsilateral to superinfection during  
186 acute phase. Furthermore, a 4-day delay or more abolished superinfecting viral gene  
187 expression in the TG ipsilateral to superinfection.

188

189 To further explore this phenomenon, we reproduced this sequence of inoculation  
190 for all following experiments (i.e. an interval of 4 days between the initial infection in the  
191 right lip and superinfection in the left lip). To determine if the elimination of  
192  $\beta$ -galactosidase activity of superinfecting gJ-LacZ virus was a consequence of restricted  
193 virus migration to TG, 2 additional groups of mice ( $n = 10$ ) were initially inoculated in the  
194 right lip with either gJ-GFP or a mock inoculum. Superinfection with gJ-LacZ was  
195 performed at 4 DPI in the left lip in all mice. Enumeration of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons  
196 at 6 DPI identified gJ-LacZ virus transcriptional activity in mice receiving an initial  
197 mock inoculation with PBS (**Figure 3A**). The vast majority of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons  
198 were found in the TGs ipsilateral (left) to inoculation with gJ-LacZ ( $62 \pm 33.5$ , range 21-  
199 138) in initially mock infected mice, compared to extremely low numbers of  
200  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons in some (4/10) contralateral (right) TGs ( $2 \pm 3.9$ , range 0 - 9).  
201 In contrast, both left and right TGs from the 10 mice that received an initial gJ-GFP

202 inoculation in the right lip before superinfection with gJ-LacZ in the left lip, lacked  
203  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons. This reduction in the number of cells harboring lytic viral  
204 replication, between initial mock- or gJ-GFP-infected groups, was significant ( $p < 0.01$ ).  
205 Using an additional group of mice, which underwent the same inoculation procedure,  
206 qPCR for LacZ sequence was performed to detect superinfecting gJ-LacZ genomic  
207 DNA load from TGs harvested at 6 DPSI ( $n = 6$  mice per group). Superinfecting virus  
208 DNA, relative to host GAPDH, was abundant in both left and right TG whether mice  
209 received an initial right-lip gJ-GFP inoculation (*Left TGs:  $8.45E-03 \pm 1.32E-02$  vs Right*  
210 *TGs:  $4.23E-03 \pm 4.06E-03$ ) or a mock inoculation (*Left TGs:  $1.73E-02 \pm 1.34E-02$  vs*  
211 *Right TGs:  $9.21E-03 \pm 1.68E-02$ ) (Figure 3B). Combined, these data demonstrated that*  
212 superinfecting virus reporter gene activity was restricted to the TG ipsilateral to lip  
213 infection (left). Thus, an initial infection in the opposite side (right) 4 days prior, lead to  
214 almost complete attenuation of superinfecting virus transcriptional activity in the TG  
215 without blocking the dissemination of virus to the TG.*

216

217 **HSV-1 infection in the lip leads to inhibition of mortality and disease, and a major**  
218 **impact on the establishment of latency by a superinfecting virus.** In the following  
219 series of experiments, we used the L $\beta$ A reporter virus for left-side superinfection to  
220 explore whether a primary infection with the attenuated gJ-GFP virus would translate  
221 into protection against L $\beta$ A-associated diseases and mortality. While the L $\beta$ A reporter  
222 virus has an insertion of the *LacZ* gene within the LAT locus, this reporter virus  
223 produces a virulent phenotype causing ocular disease and mortality in lip-infected mice,  
224 comparable to that of parental SC16 wild-type (20).

225

226 Two groups of mice ( $n = 30$  per group) were initially mock infected, or initially infected  
227 with gJ-GFP, in the right lip. All mice were then superinfected with L $\beta$ A in the left lip 4  
228 days later. During acute phase, mice that received the initial mock inoculation exhibited  
229 signs of ocular diseases (67%), which included corneal clouding, corneal  
230 neovascularization and/or iris atrophy with pupil mydriasis (**Figure 4A**). Furthermore,  
231 40 % experienced death during the first 10 days, similar to previous observations of  
232 acute phase L $\beta$ A infection (**Figure 4B**) (**20**). In contrast, when mice received the initial  
233 gJ-GFP inoculation before L $\beta$ A, there were no signs of ocular morbidity, or mortality  
234 (**Figures 4A and 4B**; *end-point  $\chi^2$  2-tailed test =  $p < 0.001$  for both A and B*).

235

236 At 28 DPSI, corresponding to superinfecting virus latency phase, mice ( $n = 6$ ) from each  
237 group were sacrificed and fixed TG sections were analyzed by microscopy for  
238  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons, as LacZ expression is a surrogate marker of LAT promoter  
239 activity in the L $\beta$ A strain (**23**). In initially mock infected mice, significant numbers of  
240  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were counted in the left TG ( $199 \pm 170.7$ , range 48-498), the  
241 TG ipsilateral to L $\beta$ A superinfection (**Figure 4C**). In stark contrast to the mock infected  
242 mice, only few  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were found in the TG ipsilateral to L $\beta$ A  
243 superinfection when mice were initially infected with gJ-GFP ( $3.5 \pm 4.4$ , range 0-9, *mock*  
244 *vs gJ-GFP initial infection:  $p < 0.01$* ). These reduced numbers of positive neurons were  
245 similar to those elicited in the contralateral TGs to superinfection of initially mock  
246 infected mice (*mock right TG:  $3.0 \pm 3.8$ , range 0-9*), and also the contralateral TG to  
247 superinfection in initially gJ-GFP infected mice (*gJ-GFP right TG: 0*). The load of  
248 superinfecting L $\beta$ A DNA was quantified in left and right TGs to rule out restricted viral  
249 dissemination as a cause for the reduction in numbers of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons.

250 L $\beta$ A superinfected animals ( $n = 6$ ), which were initially mock or gJ-GFP infected, were  
251 sacrificed and DNA extracted from TGs. Quantification of L $\beta$ A by qPCR, relative to host  
252 GAPDH, demonstrated no significant difference in superinfecting L $\beta$ A genome loads  
253 between left and right TGs, or between TGs of mice initially mock or gJ-GFP infected  
254 (*gJ-GFP or mock:  $p > 0.05$  for all comparisons*) (**Figure 4D**). These data demonstrated  
255 that while L $\beta$ A virus disseminated to both TG during acute phase, an initial infection 4  
256 days prior in the lip opposite to superinfection prevented superinfecting L $\beta$ A-mediated  
257 ocular disease and mortality without blocking viral dissemination, and included the  
258 attenuation of LAT promoter activity during latent phase.

259

260 **HSV-1 TK<sub>del</sub> mutant infection in the lip attenuates acute and latent superinfecting**  
261 **virus activity and eliminates reactivation from latency.** Our original objective was to  
262 determine how altering kinetics of infection would influence superinfections, specifically.  
263 Thus, to avoid bias towards reactivation that might be elicited by initial reporter virus  
264 reactivations in the TG explant method (**24**), we sought a virus mutant that would be  
265 unable to reactivate from TGs for use as the initial inoculating virus. Previous studies  
266 have shown that HSV-1 mutants deficient for thymidine kinase (TK) expression were  
267 unable to replicate in neurons (non-neurovirulent), but could still enter latency and  
268 persist in neuronal cells of immunocompetent animals (**24**). Ideally, these mutants could  
269 not reactivate from a latent state without rescue by non-defective virus (**24-28**). We  
270 utilized a TK<sub>del</sub> mutant derived from the SC16 parent strain for initial infections in  
271 reactivation studies (**26**). Non-reactivable TK<sub>del</sub> allowed us to observe how reactivation  
272 from latency of the superinfecting virus alone would be influenced by the altered kinetics  
273 introduced by the earlier initial infection.

274

275 Mice were initially mock infected, or infected with TK<sub>del</sub> in the right lip. Four DPI, mice  
276 were superinfected with LβA ( $n = 17$ ), or with SC16 wild-type virus ( $n = 20$ ) in the left lip.  
277 During the acute phase of LβA or SC16 superinfection (and up to 15 DPSI), mice that  
278 received an initial TK<sub>del</sub> inoculation lacked signs of ocular morbidity, mortality, and  
279 weight loss (LβA: **Figure 5A, 5B** and **5C**; *end-point*  $Ch^2$  2-tailed test =  $p < 0.001$  for  
280 *both A and B*). In contrast, mice which were initially mock infected, exhibited the  
281 expected rates of morbidity described earlier with LβA alone (**20**).

282

283 Mice ( $n = 5$ ) from both groups were randomly sampled at day 6 DPSI to observe LβA-  
284 associated LAT promoter activity during acute phase (**Figure 5D**). As expected, all of  
285 the left TGs from mice that were initially mock infected, before superinfection in the left  
286 lip with LβA, contained β-galactosidase<sup>+ve</sup> neurons ( $272 \pm 155.5$ , range 99 - 483).  
287 Furthermore, TGs contralateral to the LβA superinfection (4/5), contained extremely low  
288 numbers of β-galactosidase<sup>+ve</sup> neurons ( $6 \pm 7.0$ , range 0 - 18). In striking contrast, both  
289 the left and right TGs from mice initially infected with TK<sub>del</sub> before left lip superinfection  
290 with LβA were almost completely devoid of β-galactosidase<sup>+ve</sup> neurons (*superinfected*  
291 *left TG: 14 ± 12.8, range 3 – 21, and superinfected right TG: 0*). This reduction in  
292 β-galactosidase<sup>+ve</sup> neurons was statistically significant ( $p = 0.009$ ). These data  
293 demonstrated that an initial infection with a virus unable to replicate in neurons could  
294 trigger protection against acute phase disease, which corresponded with the attenuation  
295 of virulent superinfection viral gene expression.

296

297 To understand further the consequences of non-neurovirulent initial infection on the  
298 transcriptional activity of superinfecting virus during latency, the LAT promoter activity  
299 was monitored during the latent phase (28 DPSI) of L $\beta$ A virus infection (**Figure 6A**).  
300 While  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were frequently detected in all TGs ipsilateral to L $\beta$ A  
301 superinfection in initially mock infected animals ( $132 \pm 75.3$ , range 72 - 219), there was  
302 a significant reduction in  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons of TGs ipsilateral to L $\beta$ A  
303 superinfection in initially TK<sub>del</sub>-infected animals ( $5 \pm 8.2$ , range 0 - 21,  $p < 0.01$ , from 3/6  
304 animals).  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons in right TGs, contralateral to L $\beta$ A superinfection,  
305 were only just detected from mock infected animals ( $1 \pm 1.1$ , range 1 - 3) and were not  
306 detected in right TGs from superinfected mice that received the initial TK<sub>del</sub> inoculation.  
307 Meanwhile, abundant loads of superinfecting L $\beta$ A viral genome were detected from the  
308 left and right TG of mock infected animals, and between mice that received an initial  
309 mock or TK<sub>del</sub> inoculation in left TGs (**Figure 6B**). Additional groups of mice were either  
310 mock infected, or infected with TK<sub>del</sub> in the right lip and then left for 1 month before  
311 superinfection in the left lip with L $\beta$ A. Mice were randomly sampled at day 28 DPSI (D  
312 56) to observe L $\beta$ A-associated LAT promoter activity during latency (**Figure 6C**).  
313 Similar to a 4 day delay, frequent  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were detected in the TG  
314 ipsilateral to infection with L $\beta$ A in mice that were initially mock infected. Whereas, in  
315 mice receiving an initial TK<sub>del</sub> inoculation,  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were almost  
316 undetectable from both TG. Meanwhile, L $\beta$ A DNA was found in both left and right TG in  
317 groups of mice that were initially inoculated with TK<sub>del</sub>, or not (**Figure 6D**). These data  
318 demonstrate that in the TG, LAT promoter activity of superinfecting virus was abrogated  
319 by initial infection with TK<sub>del</sub> in the lip from 4 days before superinfection in the  
320 contralateral lip, and were long-lived up to 28 DPSI.

321

322 Superinfecting virus reactivations from latency after the TK<sub>del</sub> initial infection were  
323 quantified from explanted TGs in 4 additional groups of mice sacrificed 28 DPI.  
324 Groups were initially mock infected, infected with TK<sub>del</sub> in the right lip or in the right  
325 footpad, and then superinfected with L $\beta$ A or wild type SC16 virus in the left lip 4 DPI.  
326 The supernatants from the TG cultures generated viral plaques only from cultures of TG  
327 ipsilateral to superinfection with L $\beta$ A or SC16 virus (left) when initially mock infected  
328 (40% and 64% of TG respectively) (**Figure 7A** and **7B**, respectively). Interestingly, no  
329 plaques were detected from any TG cultures from mice that were initially infected in the  
330 lip with TK<sub>del</sub>, and superinfected with L $\beta$ A or the SC16 wild type. However, 53% of TG  
331 cultures from mice that were initially infected in the footpad with TK<sub>del</sub> generated viral  
332 plaques. These data demonstrated that a fully virulent superinfecting HSV-1, which is  
333 normally capable of reactivating, and was present in abundance bilaterally (at a viral  
334 load compatible with reactivation), was unable to reactivate if mice were initially infected  
335 in the lip, but not the footpad with non-neurovirulent virus 4 days prior to the  
336 contralateral superinfection. We can infer that TK<sub>del</sub> was not rescued by the  
337 superinfection 4 days later, or during TG explant culture. These results indicate that an  
338 initial TK<sub>del</sub> infection did not prevent superinfecting L $\beta$ A from entering the TGs to  
339 establishing latency, as assessed by measurement of latent DNA loads. However, an  
340 initial TK<sub>del</sub> infection in the lip lead to control of transcriptional activity of the HSV-1  
341 genomes, and blocked reactivation. In contrast, an initial TK<sub>del</sub> infection in the footpad  
342 did not abrogate reactivations from latency.

343

344 **Attenuation of acute disease mediated by initial HSV-1 TK<sub>del</sub> inoculation occurs**  
345 **systemically.** To further probe the ability of initial TK<sub>del</sub> inoculation to dictate acute  
346 phase and latent phase superinfection outcomes, mice were initially mock infected, or  
347 infected with TK<sub>del</sub> in the right lip or right footpad. After 4 days, mice were challenged  
348 with virulent SC16 in the left lip and mice were monitored for signs of disease. Mice that  
349 were initially mock infected displayed rates of mortality (~30%), ocular disease (~60%)  
350 and weight loss, as expected after a challenge with virulent SC16 in the lip (**Figures 8A,**  
351 **8B** and **8C**). In contrast, mice that received an initial inoculation of TK<sub>del</sub> in the lip or  
352 footpad were completely protected from signs of disease. These data demonstrate that  
353 acute phase disease, as a consequence of virulent superinfection in the lip, was  
354 attenuated systemically by an initial inoculation with TK<sub>del</sub> 4 days prior to superinfection.

355

## 356 **Discussion**

357 In humans, almost all HK recurrences are unilateral (**6, 11**), while the viral load is  
358 not statistically different between left and right TG for a given patient (**5, 12, 13**). These  
359 data suggest that HSV-1 infection yields a different state of latency between left and  
360 right TGs of the same infected individual. Using a mouse model of HSV-1 labial primary  
361 infection, where infection is performed unilaterally at the orofacial cavity, we have  
362 previously demonstrated that both ipsilateral and contralateral TGs are infected with a  
363 2-day delay between the former and the latter in any given animal (**21, 22**).

364

365 Using this model in the present study, we have shown that HSV-1 reactivation  
366 occurs solely from the TG ipsilateral to infection (**Figure 1A**), while virus genomic DNA  
367 is present bilaterally (**Figure 1B**). As symmetrical nerve networks innervating the left



368 and right sides of the face are directly linked to a corresponding left or right TG **(20)**,  
369 virus propagation from a primary lip infection, localized to one side of the face, is directly  
370 associated with axons of the TG aligned to that side of the face, thus explaining how  
371 this ipsilateral TG is infected before the contralateral TG. We therefore hypothesized  
372 that asymmetry of HSV-1 acute phase activity and recurrences in humans are  
373 associated with differential kinetics of virus arrival in ipsilateral and contralateral TGs  
374 during orofacial infection. Upon lip infection, the virus must disseminate through second  
375 and third order midbrain neurons of the trigeminal pathways to reach the contralateral  
376 TG, but with a delay in comparison to infection of the TG that is ipsilateral and directly  
377 connected to the infected lip site (as described in **(19, 20)**). We confirmed this notion by  
378 utilizing a dual inoculation process, where an initial HSV-1 infection in the lip aligned to  
379 one side, was followed by a contralateral lip superinfection with different reporter viruses  
380 derived from the same HSV-1 strain. Delaying by 4 days or more the inoculation of  
381 superinfecting virus resulted in a complete inhibition of the acute phase of  
382 superinfection in the ipsilateral TG **(Figure 2 and 3A)**, with concomitant elimination of  
383 morbidity and mortality **(Figure 4A and B)**. Virus was still propagated to the ipsilateral  
384 and contralateral TG, as detected by viral genomic qPCR **(Figures 3B, 4D, 6B, and 6D)**.  
385 Interestingly, this 4-day window of time correlated with the time to develop adaptive  
386 immune surveillance, critical in the control of acute phase HSV-1 infection in other  
387 mouse models **(29-31)**. HSV-1-specific cytotoxic T cell function has been recorded in  
388 draining lymph nodes as early as 2 DPI, and proliferating HSV-1-specific T cells were  
389 found in the spleen 4 DPI **(32)**, and these cells provide a long-lived protection by  
390 mounting rapid responses to a viral challenge. On the other hand, innate anti-HSV-1  
391 mechanisms triggered by neurons, and driven by type I and type II interferons, have

392 been reported to shut down viral transmission and repress acute phase HSV-1 lytic  
393 activity **(33, 34)**. The outcome of HSV-1 infection of the TG is further dictated by the  
394 neuronal subtypes infected that are infected, with NefH<sup>+ve</sup> neurons more efficient for  
395 harboring virus in latent state versus NefH<sup>-ve</sup> which are more efficient in harboring lytic  
396 viral replication **(35, 36)**. Even so, our observations from dual infection, where altered  
397 kinetics of TG infection incurred attenuation of viral replication in the contralateral TG,  
398 may illustrate why acute phase HSV-1 activity is restricted to the ipsilateral TG after  
399 orofacial infection. Indeed, a plausible explanation raised from our experiments is that  
400 while the TG ipsilateral to the site of orofacial inoculation becomes infected rapidly, the  
401 delay in travel time for virions to arrive in the contralateral TG enables the development  
402 of appropriate antiviral mechanisms in the host, which elicit protection against viral  
403 replication and associated disease of the contralateral side.

404

405 The use of thymidine kinase-deficient mutant, TK<sub>del</sub>, for the initial infection  
406 allowed us to question further the implications of delayed superinfection of the  
407 contralateral TG on viral reactivations. The TK<sub>del</sub> mutant HSV-1 can cause a fulminant  
408 infection in epithelial tissue during acute infection, is known for its capacity to establish  
409 latency and persist, but is unable to reactivate or replicate in neurons **(24, 26, 37)**.  
410 Infectious particles can only be found at the site of lip infection during acute phase, and  
411 not from either TG (*data available upon request*). Hence, this mutant virus is unable to  
412 spread from one neuron to another in the TG, and by extension cannot proceed to the  
413 TG contralateral to lip infection. Here, we describe a major protective state elicited by  
414 TK<sub>del</sub> infection. LAT promoter activity of the L $\beta$ A superinfecting virus, as well as ocular  
415 signs of disease, and mortality of the superinfected mice were eliminated by initial

416 infection with the TK<sub>del</sub> mutant virus (**Figures 5, 6, and 8**). While efficient protection  
417 elicited by priming with attenuated virus is in line with previous experimental reports (**37-**  
418 **42**), of great interest was the complete absence of virulent wild type superinfecting virus  
419 reactivations from ipsilateral and contralateral TGs in initially TK<sub>del</sub>-infected animals  
420 (**Figure 7**). To establish protection against reactivation, footpad initial infection (not  
421 affecting the trigeminal neural network) was ineffective at blocking reactivations while  
422 contralateral lip infection was. In contrast, initial inoculation with TK<sub>del</sub> in the footpad was  
423 able to elicit attenuation of acute phase disease (**Figure 8**). These findings suggest that  
424 different immune- or virus-mediated mechanisms are required to protect against acute  
425 phase lytic gene expression and associated disease versus blocking reactivations.  
426 Therefore, yet unappreciated mechanisms exists for controlling viral reactivation that  
427 may involve properties unique to non-neurovirulent HSV-1 mutants. Further studies are  
428 required to determine whether the prophylaxis against reactivation elicited by TK<sub>del</sub> is  
429 mediated by eliciting local adaptive cellular immunity (**37**), and/or by HSV-1-mediated  
430 cellular level functions (**14, 18**). Defining these conditions may enable exploitation for  
431 the control of viral reactivation from the TG.

432

433         Our study was motivated by observations of unilateral HSV-1 infection and  
434 reactivation in the OO model, and by clinical observations of recurrent unilateral human  
435 ocular disease. Altered lateral kinetics of infection, elicited by performing an initial  
436 inoculation in the lip contralateral to a delayed secondary infection, attenuated  
437 superinfection viral gene expression. A key time point of 4 days delay between  
438 infections was discovered, after which protective mechanisms had extended to include  
439 the lip and/or TG contralateral to the side of initial infection. These results are promising,

440 as the natural origin of HSV-1-mediated ocular disease is from viral replication in the TG.  
441 However, superinfecting viral DNA was abundant in the opposing TGs, illustrating  
442 uncontained viral dissemination through the neural network. Initial infection with TK<sub>del</sub>  
443 lead to a profound absence of viral reactivations from latency in mice superinfected with  
444 virulent HSV-1. These results indicate that reactivation, and more particularly unilateral  
445 recurrence, are a manifestation of latency establishment early during acute phase  
446 infection where: the ipsilateral TG is directly-linked to the orofacial site of inoculation,  
447 and is infected before a critical state of immunity has occurs, in contrast to the  
448 contralateral TG that is infected after this event. Further characterization of the  
449 mechanism restricting virus activity unilaterally will help to elucidate effective strategies  
450 for eliminating virus reactivation from the TG. These results are promising for  
451 understanding how the kinetics of HSV-1 infection influence the unilateral nature of  
452 virus activity and disease, and for future studies aiming to develop preventive or  
453 therapeutic strategies. Future directions should include elucidation of local immune  
454 phenomena and inflammatory processes that are altered by the delayed orofacial  
455 infection kinetics, to discover how non-neurovirulent virus initial infection inhibits HSV-1  
456 reactivation from the TG; these are the subjects of our ongoing studies.

457

## 458 **MATERIALS AND METHODS**

### 459 **Virus strains and cells**

460 The wild type SC16 strain of HSV-1 **(43)** was used as background for the following  
461 genetically modified viruses;

462 Reporter viruses SC16-BE8 **(44)** and SC16-C12 **(45)**, termed gJ-LacZ and gJ-  
463 GFP in this manuscript, respectively contain an IE1CMV (immediate early promoter 1 of

464 cytomegalovirus) promoter-driven *LacZ* or *eGFP* gene inserted in the U<sub>S</sub>5 locus  
465 (encoding the gJ protein).  $\beta$ -galactosidase activity or eGFP fluorescence were used as  
466 virus-specific markers of active viral replication.

467 The recombinant L $\beta$ A strain contains an encephalomyocarditis virus internal  
468 ribosomal entry site (IRES) inserted just before the *LacZ* gene of *Escherichia coli*  
469 (insertion into a 168-bp HpaI deletion, nucleotides 120301 to 120469) within the major  
470 LAT locus **(23)**.  $\beta$ -galactosidase activity was used as a strain-specific marker for active  
471 viral replication, and to assess LAT promoter activity.

472 The recombinant HSV-1 SC16 mutant TKDM21, termed TK<sub>del</sub> in this manuscript,  
473 harbors an 816-bp deletion within the Thymidine Kinase (TK) coding region **(26)**.  
474 Viruses were propagated and titrated using the VERO cell line (ATCC) as previously  
475 described **(19)**.

476 The expression of *eGFP* and *LacZ* cassettes from these strains faithfully reflect  
477 the transcription or expression of viral genes driven by the same promoters **(20, 46)**.  
478 These strain-specific reporter genes were targeted for detection of specific viral  
479 genomes by qPCR, and strain-specific reporter gene expression were quantified as  
480 surrogate markers for strain-specific viral activity.

481

## 482 **Inoculation procedures**

483 Six-week-old inbred female BALB/c mice (Janvier Breeding, Le Genest-Saint-Isle,  
484 France), receiving unrestricted access to food and water, were used for the experiments.  
485 Procedures were performed under general anaesthesia induced by intraperitoneal  
486 injection of 0.1ml of a solution containing ketamine (25mg/ml) and xylazine (20mg/ml).  
487 Analgesic was added to drinking water during the first 10 DPSI. Using a custom-made

488 glass microneedle and Harvard microinjector, viral suspensions in saline solution of  $1 \times$   
489  $10^6$  plaque-forming-units (PFU) of virus in 1  $\mu$ l volumes were injected below the  
490 epithelium of the right upper lip for initial infections. One microliter of saline was  
491 administered for mock inoculation. Superinfecting virus of identical virus load and  
492 volume was inoculated at defined later time points below the epithelium of the left upper  
493 lip, as previously described **(19)**. Mice were observed daily for clinical signs of ocular  
494 infection from 0 to 28 days post-superinfection (DPSI), as previously described **(20)**.  
495 Mice were randomly sacrificed at either 6 DPSI for acute infection, or 28 DPSI for latent  
496 infection and reactivation studies. The experimental procedures involving animals were  
497 performed under general anesthesia. All procedures involving experimental animals  
498 conformed to ethical standards of the Association for Research in Vision and  
499 Ophthalmology (ARVO) Statement for the use of animals in research and were  
500 approved by the local ethics committee (CEEA 59).

501

#### 502 **Quantification of HSV-1-infected cells and viral genome copy number in TGs**

503 After sacrifice, TG were removed and processed according to the procedures for X-Gal  
504 assays on histological cryosections, or for qPCR on DNA extracts from whole tissues,  
505 as previously described **(22)**. Primers used for quantification of reporter regions of HSV-  
506 1 strain genomic DNA gJ-LacZ and gJ-GFP are listed in **Table 1**, or as defined for gG in  
507 Cavallero *et al* **(22)**. qPCR conditions for viral DNA amplification involved: activation for  
508 15 min at 95°C, amplification for 15 s at 94°C and 1 min at 58°C (repeated 40 times),  
509 hold 5 min at 25°C; for GAPDH PCR: activation for 15 min at 95°C, amplification for 15  
510 s at 94°C, 1 min at 58°C and 130 s at 72°C (repeated 30 times), melting curve for 1 min

511 from 50°C to 90°C. Viral genome copy number was determined, relative to murine  
512 GAPDH.

513

#### 514 ***Ex vivo* explant reactivation assay**

515 In the OO model, a state of HSV-1 latency is achieved at 28 DPI **(20)**. Latency is  
516 disrupted by culture of TG *ex vivo*, which results in the release of infectious virus into  
517 the culture supernatant, corresponding to *ex vivo* reactivation **(47)**. Mice were sacrificed  
518 28 DPSI, and both TG were removed then cultured in culture medium (CM): Dulbecco's  
519 modified eagle medium (DMEM) supplemented with 8% fetal calf serum and 1%  
520 streptomycin + penicillin. An aliquot of medium (200 µl) was sampled from each culture  
521 well every 2 days for up to 14 days, and an equivalent 200 µl of medium was added to  
522 the TG culture to compensate for the loss. TG culture medium from days 0, 4, 6, 8, 10  
523 and 14 were plated on VERO cell monolayers to perform plaque-assays using serial  
524 dilutions ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ). Reactivation was recorded for a single TG if plaques were  
525 observed for any of the time points measured. Generally, between 2 to 10,000 plaques  
526 were enumerated, and the peak yield of infectious virus usually occurred at day 8 of  
527 culture.

528

#### 529 **Plaque assay for the identification and quantification of virus**

530 To identify the virus that reactivated following PI with gJ-GFP, and superinfection with  
531 gJ-LacZ or LβA, all GFP<sup>+ve</sup> and GFP<sup>-ve</sup> plaques were enumerated by fluorescent  
532 microscopy. β-galactosidase<sup>+ve</sup> GFP<sup>-ve</sup> plaques were identified by staining cell  
533 monolayers with neutral red (0.02%) after fixation with paraformaldehyde 4% for 15 min  
534 at room temperature, and counterstaining with X-Gal reactant (0.33 mg/ml X-Gal (5-

535 bromo-4chloro-3-indolyl--D-galactopyranoside), 5 mM  $K_4Fe(CN)_6$ , 5 mM  $K_3Fe(CN)_6$ , 2  
536 mM  $MgCl_2$ , 0.01% sodium deoxycholate, and 0.1% Triton X-100) for 1h at 37°C.  
537 Plaques that expressed  $\beta$ -galactosidase stained blue, whereas the GFP-expressing  
538 virus, TK<sub>del</sub>- and SC16- wild-type-associated plaques remained transparent. When TK<sub>del</sub>,  
539 SC16, or a mock inoculation was performed initially, the identification of SC16 or L $\beta$ A  
540 strain reactivation plaques was performed after staining the cell monolayer with crystal  
541 violet.

542

### 543 **Infectious HSV-1 particle titration of homogenized TG**

544 As described previously (34), the TG harvested from sacrificed mice were homogenized  
545 in microtubes containing 250 $\mu$ L of DMEM medium. Three cycles of freezing/thawing  
546 were performed with liquid nitrogen, and the samples were centrifuged and  
547 supernatants stored at -80°C until use. Serial dilutions were used to titrate the virus on  
548 VERO cells using plaque-assays (as described above).

549

### 550 **Statistical analyses**

551 The non-parametric Kruskal-Wallis test was used to analyze histological data and viral  
552 DNA loads (qPCR). Means and 95% confidence intervals (CI) were calculated with  
553 STATA 13.1 (StataCorp, USA). End-point Chi<sup>2</sup> 2-tailed test was performed for survival  
554 curves.

555

### 556 **ACKNOWLEDGMENTS**



557 The authors are warmly thankful to Vincent Marechal and Flore Rozenberg for  
558 constructive discussions about results, and to Rich Bains for careful proofreading of the  
559 manuscript.

560

561 This study was supported by research grant from Agence Nationale de la Recherche  
562 (ANR) (grant # ANR-18-CE15-0014-01 (EPIPPO project)), the Ministere de l'Education  
563 Nationale de la Recherche et de Technologie (MENRT), the *Société Française*  
564 *d'Ophthalmologie* (SFO), the *Fondation pour les Aveugles de Guerre* (FAG), the  
565 *Fondation de France* (FAF).

566

## 567 REFERENCES

- 568 1. Roizman B, Knipe DM. 2001. Herpes simplex viruses and their replication, p 2399-2459. *In*  
569 Knipe DM, Howley PM, Griffin DE, Lamb RA, Martin MA, Roizman B, Straus SE (ed), *Fields*  
570 *Virology*, vol 4. Raven Publishers, Philadelphia.
- 571 2. Liesegang TJ. 1989. Epidemiology of ocular herpes simplex. Natural history in Rochester, Minn,  
572 1950 through 1982. *ArchOphthalmol* 107:1160-1165.
- 573 3. Farooq AV, Shukla D. 2012. Herpes simplex epithelial and stromal keratitis: an epidemiologic  
574 update. *Surv Ophthalmol* 57:448-62.
- 575 4. Smith GA, Gross SP, Enquist LW. 2001. Herpesviruses use bidirectional fast-axonal transport to  
576 spread in sensory neurons. *ProcNatlAcadSciUSA* 98:3466-3470.
- 577 5. Richter ER, Dias JK, Gilbert JE, Atherton SS. 2009. Distribution of herpes simplex virus type 1  
578 and varicella zoster virus in ganglia of the human head and neck. *JInfectDis* 200:1901-1906.
- 579 6. Kaye S, Choudhary A. 2006. Herpes simplex keratitis. *ProgRetinEye Res* 25:355-380.
- 580 7. Lewis ME, Leung WC, Jeffrey VM, Warren KG. 1984. Detection of multiple strains of latent  
581 herpes simplex virus type 1 within individual human hosts. *J Virol* 52:300-5.
- 582 8. Liesegang TJ, Melton LJd, Daly PJ, Ilstrup DM. 1989. Epidemiology of ocular herpes simplex.  
583 Incidence in Rochester, Minn, 1950 through 1982. *ArchOphthalmol* 107:1155-1159.
- 584 9. Labetoulle M, Auquier P, Conrad H, Crochard A, Daniloski M, Bouee S, El Hasnaou iA, Colin J.  
585 2005. Incidence of herpes simplex virus keratitis in France. *Ophthalmology* 112:888-895.
- 586 10. Young RC, Hodge DO, Liesegang TJ, Baratz KH. 2010. Incidence, recurrence, and outcomes of  
587 herpes simplex virus eye disease in Olmsted County, Minnesota, 1976-2007: the effect of oral  
588 antiviral prophylaxis. *ArchOphthalmol* 128:1178-1183.
- 589 11. Liesegang TJ. 2001. Herpes simplex virus epidemiology and ocular importance. *Cornea* 20:1-13.
- 590 12. Motani H, Sakurada K, Ikegaya H, Akutsu T, Hayakawa M, Sato Y, Yajima D, Sato K, Kobayashi K,  
591 Iwase H. 2006. Detection of herpes simplex virus type 1 DNA in bilateral human trigeminal  
592 ganglia and optic nerves by polymerase chain reaction. *JMedVirol* 78:1584-1587.
- 593 13. Cohrs RJ, Randall J, Smith J, Gilden DH, Dabrowski C, van Der KH, Tal-Singer R. 2000. Analysis  
594 of individual human trigeminal ganglia for latent herpes simplex virus type 1 and varicella-  
595 zoster virus nucleic acids using real-time PCR. *JVirol* 74:11464-11471.

- 596 14. Criddle A, Thornburg T, Kochetkova I, DePartee M, Taylor MP. 2016. gD-Independent  
597 Superinfection Exclusion of Alphaherpesviruses. *J Virol* 90:4049-58.
- 598 15. Meignier B, Norrild B, Roizman B. 1983. Colonization of murine ganglia by a superinfecting  
599 strain of herpes simplex virus. *Infect Immun* 41:702-8.
- 600 16. Centifanto-Fitzgerald YM, Varnell ED, Kaufman HE. 1982. Initial herpes simplex virus type 1  
601 infection prevents ganglionic superinfection by other strains. *Infect Immun* 35:1125-32.
- 602 17. Price RW, Walz MA, Wohlenberg C, Notkins AL. 1975. Latent infection of sensory ganglia with  
603 herpes simplex virus: efficacy of immunization. *Science* 188:938-40.
- 604 18. Mador N, Panet A, Steiner I. 2002. The latency-associated gene of herpes simplex virus type 1  
605 (HSV-1) interferes with superinfection by HSV-1. *J Neurovirol* 8 Suppl 2:97-102.
- 606 19. Labetoulle M, Kucera P, Ugolini G, Lafay F, Frau E, Offret H, Flamand A. 2000. Neuronal  
607 propagation of HSV1 from the oral mucosa to the eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 41:2600-2606.
- 608 20. Labetoulle M, Maillat S, Efstathiou S, Dezelee S, Frau E, Lafay F. 2003. HSV1 latency sites after  
609 inoculation in the lip: assessment of their localization and connections to the eye.  
610 *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:217-225.
- 611 21. Maillat S, Crepin S, Naas T, Roque-Afonso AM, Lafay F, Efstathiou S, Labetoulle M. 2006. Herpes  
612 simplex virus type 1 latently infected neurons differentially express the latency associated and  
613 ICP0 transcripts. *J Virol* 80:9310-9321.
- 614 22. Cavallero S, Huot N, Francelle L, Lomonte P, Naas T, Labetoulle M. 2014. Biological features of  
615 Herpes simplex virus type 1 latency in mice according to experimental conditions and type of  
616 neurones. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 55:7761.
- 617 23. Lachmann RH, Efstathiou S. 1997. Utilization of the herpes simplex virus type 1 latency-  
618 associated regulatory region to drive stable reporter gene expression in the nervous system.  
619 *J Virol* 71:3197-3207.
- 620 24. Coen DM, Kosz-Vnenchak M, Jacobson JG, Leib DA, Bogard CL, Schaffer PA, Tyler KL, Knipe DM.  
621 1989. Thymidine kinase-negative herpes simplex virus mutants establish latency in mouse  
622 trigeminal ganglia but do not reactivate. *Proc Natl Acad Sci U S A* 86:4736-40.
- 623 25. Wilcox CL, Crnic LS, Pizer LI. 1992. Replication, latent infection, and reactivation in neuronal  
624 culture with a herpes simplex virus thymidine kinase-negative mutant. *Virology* 187:348-52.
- 625 26. Efstathiou S, Kemp S, Darby G, Minson AC. 1989. The role of herpes simplex virus type 1  
626 thymidine kinase in pathogenesis. *J Gen Virol* 70 ( Pt 4):869-79.
- 627 27. Thompson RL, Sawtell NM. 2000. Replication of herpes simplex virus type 1 within trigeminal  
628 ganglia is required for high frequency but not high viral genome copy number. *J Virol* 74:965-  
629 974.
- 630 28. Chen SH, Pearson A, Coen DM, Chen SH. 2004. Failure of thymidine kinase-negative herpes  
631 simplex virus to reactivate from latency following efficient establishment. *J Virol* 78:520-3.
- 632 29. Gurung HR, Carr MM, Carr DJ. 2017. Cornea lymphatics drive the CD8(+) T-cell response to  
633 herpes simplex virus-1. *Immunol Cell Biol* 95:87-98.
- 634 30. Vahed H, Agrawal A, Srivastava R, Prakash S, Coulon PA, Roy S, BenMohamed L. 2018. Unique  
635 Type I Interferon, Expansion/Survival Cytokines and JAK/STAT Gene Signatures of Multi-  
636 Functional HSV-Specific Effector Memory CD8(+) TEM Cells Are Associated with Asymptomatic  
637 Ocular Herpes in Humans. *J Virol* doi:10.1128/jvi.01882-18.
- 638 31. Greyer M, Whitney PG, Stock AT, Davey GM, Tebartz C, Bachem A, Mintern JD, Strugnell RA,  
639 Turner SJ, Gebhardt T, O'Keefe M, Heath WR, Bedoui S. 2016. T Cell Help Amplifies Innate  
640 Signals in CD8(+) DCs for Optimal CD8(+) T Cell Priming. *Cell Rep* 14:586-597.
- 641 32. Coles RM, Mueller SN, Heath WR, Carbone FR, Brooks AG. 2002. Progression of armed CTL  
642 from draining lymph node to spleen shortly after localized infection with herpes simplex virus  
643 1. *J Immunol* 168:834-838.
- 644 33. Song R, Koyuncu OO, Greco TM, Diner BA, Cristea IM, Enquist LW. 2016. Two Modes of the  
645 Axonal Interferon Response Limit Alphaherpesvirus Neuroinvasion. *MBio* 7:e02145-15.

- 646 34. Maroui MA, Calle A, Cohen C, Streichenberger N, Texier P, Takissian J, Rousseau A, Poccardi N,  
647 Welsch J, Corpet A, Schaeffer L, Labetoulle M, Lomonte P. 2016. Latency Entry of Herpes  
648 Simplex Virus 1 Is Determined by the Interaction of Its Genome with the Nuclear Environment.  
649 PLoS Pathog 12:e1005834.
- 650 35. Cabrera JR, Charron AJ, Leib DA. 2018. Neuronal Subtype Determines Herpes Simplex Virus 1  
651 Latency-Associated-Transcript Promoter Activity during Latency. J Virol 92.
- 652 36. Bertke AS, Swanson SM, Chen J, Imai Y, Kinchington PR, Margolis TP. 2011. A5-positive primary  
653 sensory neurons are nonpermissive for productive infection with herpes simplex virus 1 in  
654 vitro. J Virol 85:6669-77.
- 655 37. Sato A, Suwanto A, Okabe M, Sato S, Nochi T, Imai T, Koyanagi N, Kunisawa J, Kawaguchi Y,  
656 Kiyono H. 2014. Vaginal memory T cells induced by intranasal vaccination are critical for  
657 protective T cell recruitment and prevention of genital HSV-2 disease. J Virol 88:13699-708.
- 658 38. Mitchell BM, Stevens JG. 1996. Neuroinvasive properties of herpes simplex virus type 1  
659 glycoprotein variants are controlled by the immune response. J Immunol 156:246-255.
- 660 39. Schrimpf JE, Tu EM, Wang H, Wong YM, Morrison LA. 2011. B7 costimulation molecules  
661 encoded by replication-defective, vhs-deficient HSV-1 improve vaccine-induced protection  
662 against corneal disease. PLoS One 6:e22772.
- 663 40. Davido DJ, Tu EM, Wang H, Korom M, Gazquez Casals A, Reddy PJ, Mostafa HH, Combs B,  
664 Haenchen SD, Morrison LA. 2018. Attenuated Herpes Simplex Virus 1 (HSV-1) Expressing a  
665 Mutant Form of ICP6 Stimulates a Strong Immune Response That Protects Mice against HSV-1-  
666 Induced Corneal Disease. J Virol 92.
- 667 41. Khan AA, Srivastava R, Chentoufi AA, Kritzer E, Chilukuri S, Garg S, Yu DC, Vahed H, Huang L,  
668 Syed SA, Furness JN, Tran TT, Anthony NB, McLaren CE, Sidney J, Sette A, Noelle RJ,  
669 BenMohamed L. 2017. Bolstering the Number and Function of HSV-1-Specific CD8(+) Effector  
670 Memory T Cells and Tissue-Resident Memory T Cells in Latently Infected Trigeminal Ganglia  
671 Reduces Recurrent Ocular Herpes Infection and Disease. J Immunol 199:186-203.
- 672 42. Royer DJ, Carr MM, Gurung HR, Halford WP, Carr DJJ. 2017. The Neonatal Fc Receptor and  
673 Complement Fixation Facilitate Prophylactic Vaccine-Mediated Humoral Protection against  
674 Viral Infection in the Ocular Mucosa. J Immunol 199:1898-1911.
- 675 43. Hill TJ, Field HJ, Blyth WA. 1975. Acute and recurrent infection with herpes simplex virus in the  
676 mouse: a model for studying latency and recurrent disease. J Gen Virol 28:341-353.
- 677 44. Proenca JT, Coleman HM, Connor V, Winton DJ, Efstathiou S. 2008. A historical analysis of  
678 herpes simplex virus promoter activation in vivo reveals distinct populations of latently  
679 infected neurones. J Gen Virol 89:2965-74.
- 680 45. Arthur JL, Scarpini CG, Connor V, Lachmann RH, Tolkovsky AM, Efstathiou S. 2001. Herpes  
681 simplex virus type 1 promoter activity during latency establishment, maintenance, and  
682 reactivation in primary dorsal root neurons in vitro. J Virol 75:3885-3895.
- 683 46. De Regge N, Van ON, Nauwynck HJ, Efstathiou S, Favoreel HW. 2010. Interferon alpha induces  
684 establishment of alphaherpesvirus latency in sensory neurons in vitro. PLoS One 5.
- 685 47. Sawtell NM, Thompson RL. 2004. Comparison of herpes simplex virus reactivation in ganglia in  
686 vivo and in explants demonstrates quantitative and qualitative differences. J Virol 78:7784-  
687 7794.

688

689 **FIGURE LEGENDS AND TABLES**

690 **Figure 1: HSV-1 SC16 reactivation and viral DNA from TG harvested during**  
691 **latency period.** BALB/c mice were inoculated in the left upper lip with wild-type HSV-1  
692 SC16 strain. At 28 DPI (i.e. a time known to correspond with latent phase of TG  
693 infection in the OO model), mice were sacrificed. **(A)** TG from mice ( $n = 12$ ) were  
694 harvested and incubated individually in culture medium (CM) for 14 days. Aliquots of  
695 medium were removed every two days, and compensated with fresh CM. Infectious  
696 particle release (reactivation) from aliquots was measured by plaque assay. Bars  
697 represent the percentage of TG cultures from individual mice in which plaques  
698 developed at any given time ( $** = p < 0.01$  (Kruskal-Wallis test)). **(B)** DNA was extracted  
699 and qPCR performed targeting the gG coding sequence or mouse GAPDH gene,  
700 according to Cavallero *et al* (22). Results were determined as the average number of  
701 gG genome copies relative to GAPDH DNA, and bars represent the 95% confidence  
702 interval.

703

704 **Figure 2: Quantification of HSV-1 superinfecting replication in the TG after initial**  
705 **infection and delayed superinfection.** In each group, BALB/c mice ( $n = 3$ ) were  
706 inoculated initially in the right upper lip with gJ-GFP (1  $\mu$ l of PBS was delivered for mock  
707 infection), and superinfected in the left upper lip with gJ-LacZ. Superinfection was  
708 performed at different time intervals per group after the primary infection on days 0 to 6,  
709 or received only gJ-LacZ in the left lip for group “C”. All mice were sacrificed during  
710 acute phase of infection at 6 DPSI with gJ-LacZ. TG frontal cryosections (10  $\mu$ m) were  
711 prepared and stained with X-Gal reactant, and counterstained with neutral red.  
712  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were enumerated. \*Note: bar indicates groups

713 corresponding to the period of time where  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were not  
714 detected (when superinfection occurred between 4 to 6 days post initial infection), data  
715 points indicate average number of cells  $\pm$  SEM.

716

717 **Figure 3: Transcriptional activity of superinfecting gJ-LacZ in TG of mice**

718 **inoculated 4 days prior with gJ-GFP.** Mice initially infected in the right upper lip with

719 gJ-GFP (or PBS for mock infection). Four days later mice were superinfected with gJ-

720 LacZ in the left upper lip and sacrificed 6 DPSI with gJ-LacZ. **(A)** TG frontal

721 cryosections (10  $\mu$ m) were prepared and stained with X-Gal reactant, and

722 counterstained with neutral red.  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were enumerated. Symbols

723 represent the number of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons from individual TG, and floating bar

724 represents the average. (\*\*\*) =  $p < 0.001$  (Kruskal-Wallis test). **(B)** DNA was extracted

725 from whole TG samples ( $n = 6$  per group) and used as template DNA for qPCR with

726 primers targeting the *LacZ* gene, or mouse GAPDH gene. The number of gJ-LacZ

727 genome copies per TG was determined relative to GAPDH. Bars indicate the average

728 number of gJ-LacZ genome copies relative to GAPDH DNA, and bars represent the

729 95% confidence interval.

730

731 **Figure 4: Mortality, ocular disease, and latency phase activity of L $\beta$ A**

732 **superinfection is extinguished in mice receiving an inoculation of gJ-GFP 4 days**

733 **prior.** BALB/c mice infected in the right upper lip with gJ-GFP (or PBS for mock

734 infection). At 4 DPI, mice were superinfected in the left upper lip with L $\beta$ A. Ocular

735 disease (corneal clouding, corneal neovascularization, iris atrophy with pupil mydriasis)

736 **(A)**, and deaths **(B)** were recorded. At 28 DPSI with L $\beta$ A, mice were sacrificed. End-

737 point  $\chi^2$  2-tailed test was performed for groups in A and B \* =  $p < 0.001$ . (C) TG  
738 frontal cryosections (10 $\mu$ m) were prepared and stained with X-Gal reactant, and  
739 counterstained with neutral red and  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were enumerated).  
740 Symbols represent the number of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons from individual TG, and  
741 floating bar represents the average (\*\* =  $p < 0.01$  (Kruskal-Wallis test)) (D) DNA was  
742 extracted from whole TG samples ( $n = 6$  per group) and used as template DNA for  
743 qPCR with primers targeting the *LacZ* gene, or GAPDH gene. The number of gJ-LacZ  
744 genome copies per TG was determined relative to GAPDH. Bars indicate the average  
745 number of gJ-LacZ genome copies relative to GAPDH DNA, and bars represent the  
746 95% confidence interval.

747

748 **Figure 5: Mortality, ocular disease, weight loss and acute phase activity of L $\beta$ A**  
749 **superinfection is extinguished in mice when initially infected with TK<sub>del</sub> 4 days**  
750 **prior.** Mice initially infected in the right lip with TK<sub>del</sub> (or PBS for mock infection) and  
751 again 4 DPI in the left lip with L $\beta$ A were monitored for 15 days. (A) Ocular disease  
752 signs: corneal clouding, corneal neovascularization, iris atrophy with pupil mydriasis,  
753 and deaths (B) were recorded. End-point  $\chi^2$  2-tailed test was performed for groups in  
754 A and B \* =  $p < 0.05$ . Weights of individual mice were recorded from before the first  
755 infection and daily for the duration of the experiment. Data in (C) represents the mean of  
756 the lowest measure for each animal during acute phase. At 6 DPSI with L $\beta$ A mice were  
757 sacrificed. (D) TG frontal cryosections (10 $\mu$ m) were prepared and stained with X-Gal  
758 reactant, counterstained with neutral red and  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons were  
759 enumerated. Symbols represent the number of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup> neurons from

760 individual TG, and floating bar represents the average. (Statistics: *Kruskal-Wallis test* \*\*  
761 =  $p < 0.01$ ).

762

763 **Figure 6: Reduced LAT promoter activity of L $\beta$ A superinfection, with maintained**  
764 **viral DNA load, in mice initially infected with TK<sub>del</sub> 4 or 28 days prior.** Mice initially  
765 infected in the right lip with TK<sub>del</sub> (or PBS for mock infection) and superinfected at 4 DPI  
766 or 28 DPI in the left lip with L $\beta$ A. Mice were sacrificed 28 DPSI. TG frontal cryosections  
767 (10 $\mu$ m) from mice, superinfected at 4 DPI (**A**) or at 28 DPSI (**C**), were prepared and  
768 stained with X-Gal reactant, and counterstained with neutral red, and  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup>  
769 neurons were enumerated. Symbols represent the number of  $\beta$ -galactosidase<sup>+ve</sup>  
770 neurons from individual TG, and floating bar represents the average. (\*\* =  $p < 0.01$   
771 (*Kruskal-Wallis test*)). DNA was extracted from whole TG samples ( $n = 5$  per group)  
772 harvested from mice that were superinfected, at 4 DPI (**B**) or 28 DPSI (**D**), and used as  
773 template DNA for qPCR with primers targeting the *LacZ* gene, or murine GAPDH gene.  
774 The number of L $\beta$ A genome copies per TG was determined relative to GAPDH. Bars  
775 indicate the average number of L $\beta$ A genome copies relative to GAPDH DNA, and bars  
776 represent the 95% confidence interval.

777

778 **Figure 7: Rates of HSV-1 reactivation from explanted TGs from mice initially**  
779 **infected with TK<sub>del</sub> and superinfected with HSV-1 SC16 wild type, or L $\beta$ A reporter**  
780 **virus, 4 days later.** Groups of BALB/c mice were initially infected in the upper right lip  
781 with TK<sub>del</sub> (or PBS for mock), or in the right footpad (TK<sub>del</sub> FOOTPAD). At 4 DPI, mice  
782 were superinfected in the left lip with the L $\beta$ A reporter virus ( $n = 10$  mice) or the wild  
783 type SC16 parent strain (*TK<sub>del</sub> lip initial*  $n = 14$  mice, *TK<sub>del</sub> footpad initial*  $n = 13$ ). All mice

784 were sacrificed at 28 DPSI, corresponding to latent phase of TG infection in the OO  
785 model. TG were harvested and incubated individually in CM during 14 days. Aliquots of  
786 medium were removed every two days, and compensated with fresh CM. Infectious  
787 particles released (reactivation) from aliquots were quantified by plaque assay. Bars  
788 represent the percentage of cultured TGs that developed plaques at any given time. (\*\*\*)  
789 =  $p < 0.001$  (Kruskal-Wallis test).

790

791 **Figure 8: Initial infection with TK<sub>del</sub> attenuates mortality, ocular disease and**  
792 **weight loss associated with virulent wild type superinfection occurring 4 days**  
793 **later.** Mice were initially mock infected with PBS or infected with TK<sub>del</sub> in the right lip ( $n$   
794 = 20 per group), or in the right footpad with TK<sub>del</sub> (TK<sub>del</sub>FOOT) ( $n = 12$  per group). At 4  
795 DPI mice were superinfected with SC16 wild type HSV-1 in the left lip, and monitored  
796 for 15 days. Deaths (**A**), and ocular disease signs: corneal clouding, corneal  
797 neovascularization, iris atrophy with pupil mydriasis (**B**) were recorded. End-point Chi<sup>2</sup>  
798 2-tailed test was performed for groups in A and B \* =  $p < 0.001$ . Weights of individual  
799 mice were recorded from before the first infection and daily for the duration of the  
800 experiment. Data in (**C**) represents the mean of the lowest measure for each animal  
801 during acute phase.

802

803 **Table 1: Sequences of primers and TaqMan probes used for quantitative PCR**



Target	Oligo	Sequence 5' to 3'
TK	Forward primer	GAAAGCTGTCCCAATCCTC
	Reverse primer	GGCTTGACCTGGCTATGTTG
	Taqman probe	FAM-TATTGGCAAGCAGCTCGTAA-TAMRA
LacZ	Forward primer	TACTGTCGTCGTCCTCAAA
	Reverse primer	TAACAACCCGTCGGATTCTCC
	Taqman probe	FAM-TATCCATTACGGTCAATCCGCCG-TAMRA
GFP	Forward primer	CAACAGCCACAACGTCTATATCATG
	Reverse primer	ATGTTGTGGCGGATCTTGAAG
	Taqman probe	FAM-CAAGCAGAAGAACGGCATCAAGGTGA-TAMRA
GAPDH	Forward primer	CAAGGTCATCCATGACAACTTGG
	Reverse primer	GGCCATCCACAGTCTTCTGG

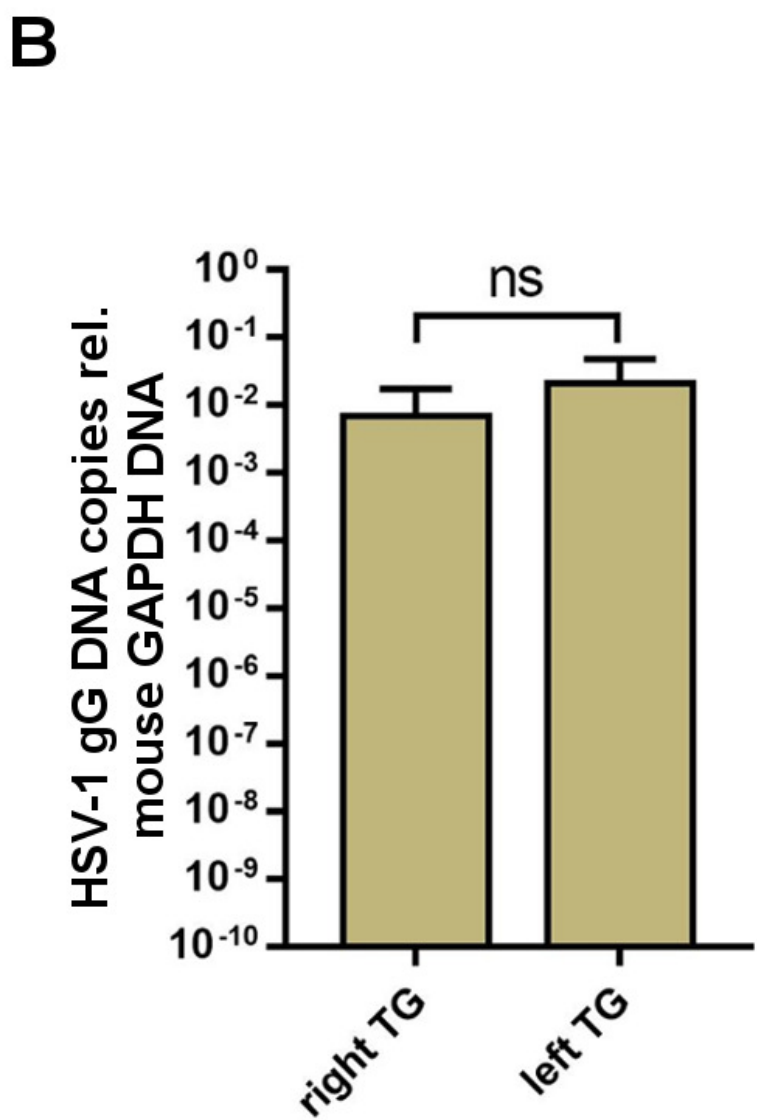
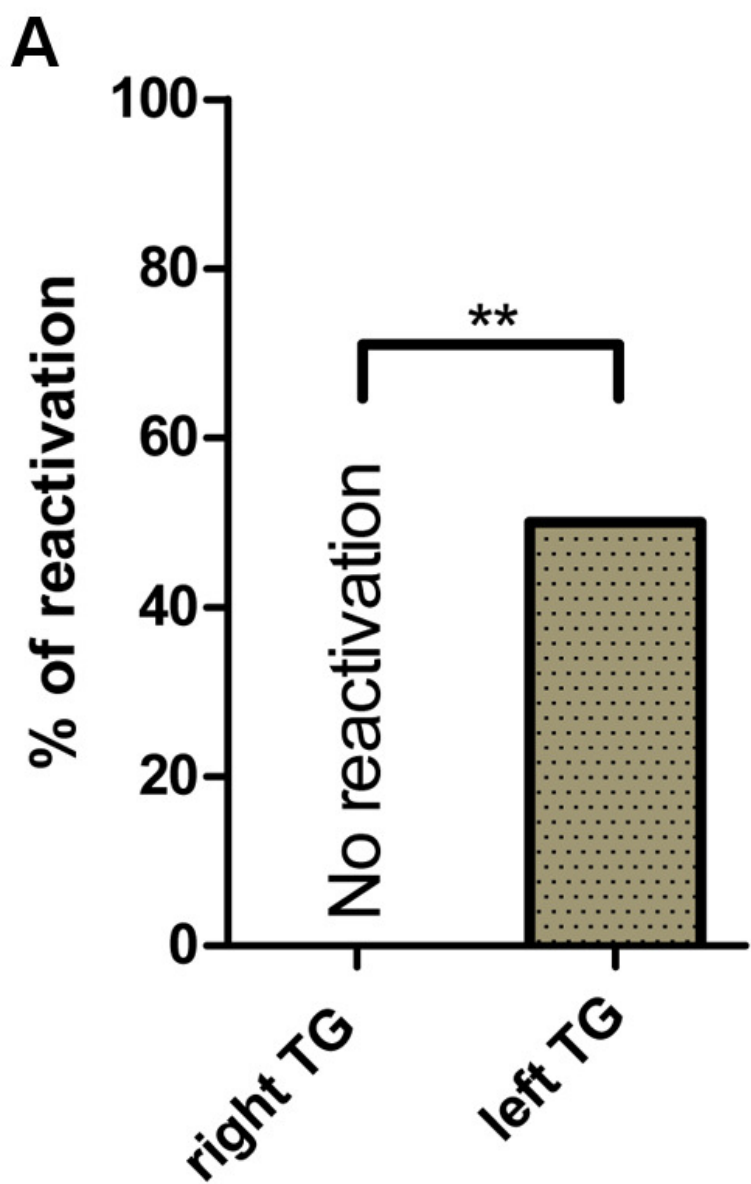
804

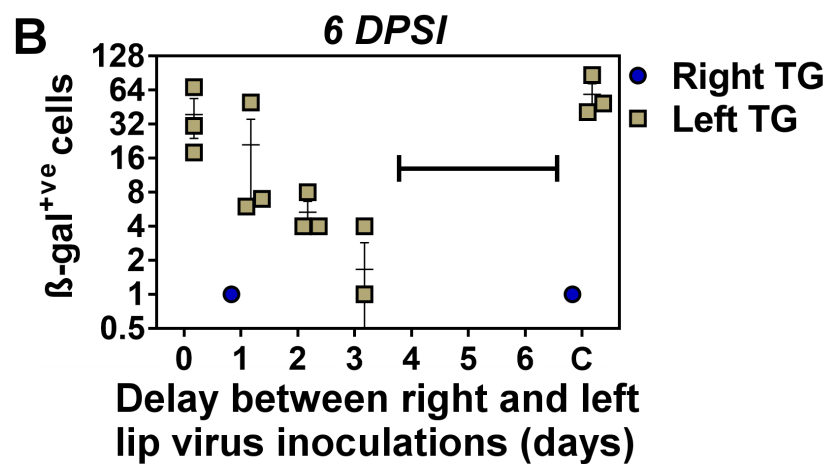
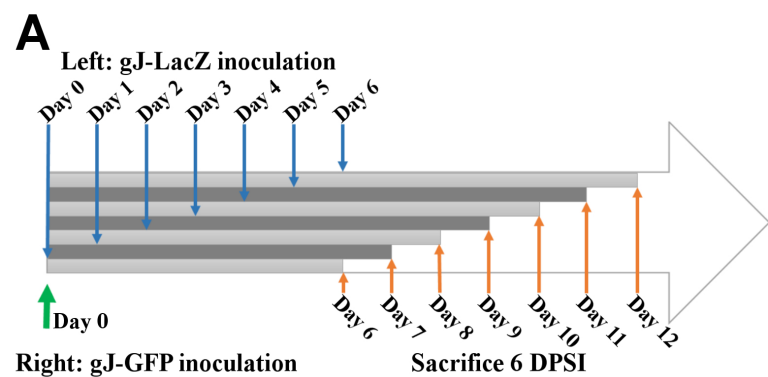
805 **Abbreviations:** Herpes simplex virus type 1 (HSV-1), trigeminal ganglia (TG),  
806 Thymidine Kinase (TK), herpetic keratitis (HK), Latency-associated transcripts (LAT),  
807 HSV-1 murine oral-ocular model (OO), primary infection (PI), days post infection (DPI),  
808 days post superinfection (DPSI), plaque-forming-units (PFU), culture medium (CM),  
809 reporter *LacZ* gene of *Escherichia coli* (LacZ), reporter gene encoding the enhanced  
810 Green Fluorescent Protein (GFP); murine Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase  
811 (GAPDH).

812

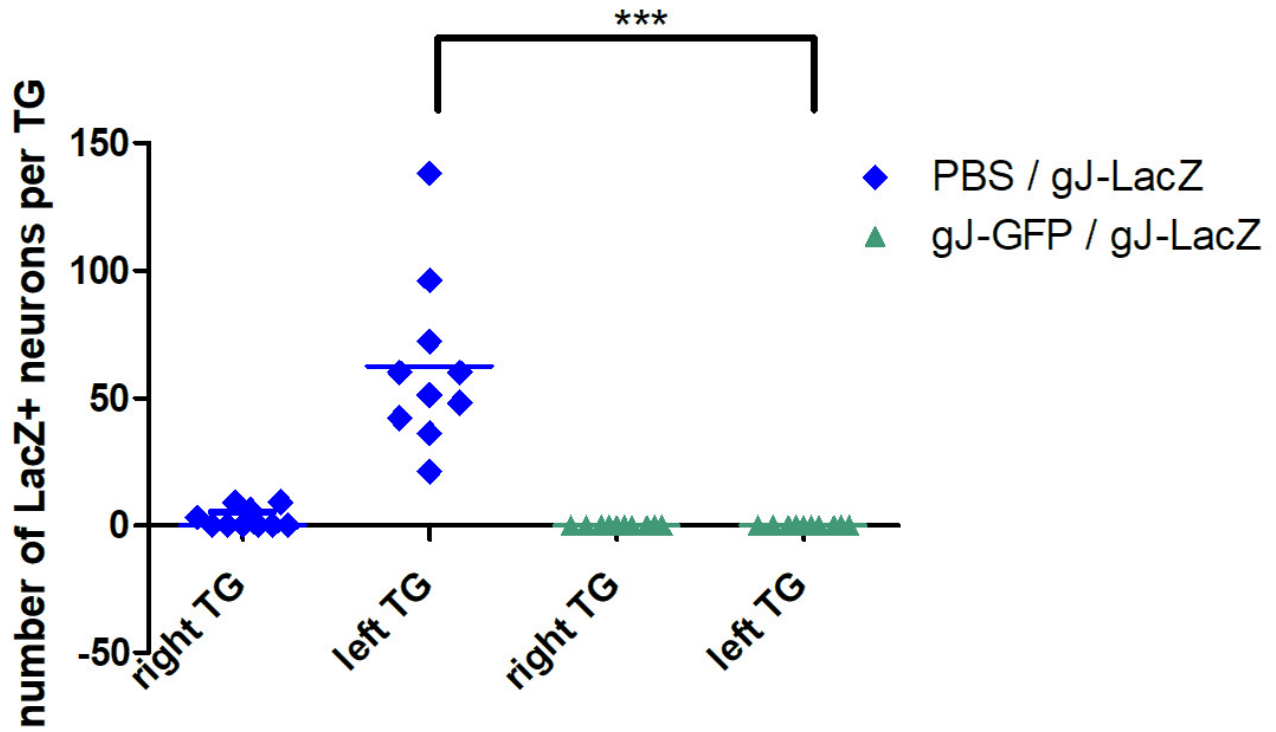
813

Target	Oligo	Sequence 5' to 3'
<b>TK</b>	Forward primer	GAAAGCTGTCCCAATCCTC
	Reverse primer	GGCTTGACCTGGCTATGTTG
	Taqman probe	FAM-TATTGGCAAGCAGCTCGTAA-TAMRA
<b>LacZ</b>	Forward primer	TACTGTCGTCGTCCCCTCAA
	Reverse primer	TAACAACCCGTCGGATTCTCC
	Taqman probe	FAM-TATCCCATTACGGTCAATCCGCCG-TAMRA
<b>GFP</b>	Forward primer	CAACAGCCACAACGTCTATATCATG
	Reverse primer	ATGTTGTGGCGGATCTTGAAG
	Taqman probe	FAM-CAAGCAGAAGAACGGCATCAAGGTGA-TAMRA
<b>GAPDH</b>	Forward primer	CAAGGTCATCCATGACAACCTTTG
	Reverse primer	GGCCATCCACAGTCTTCTGG

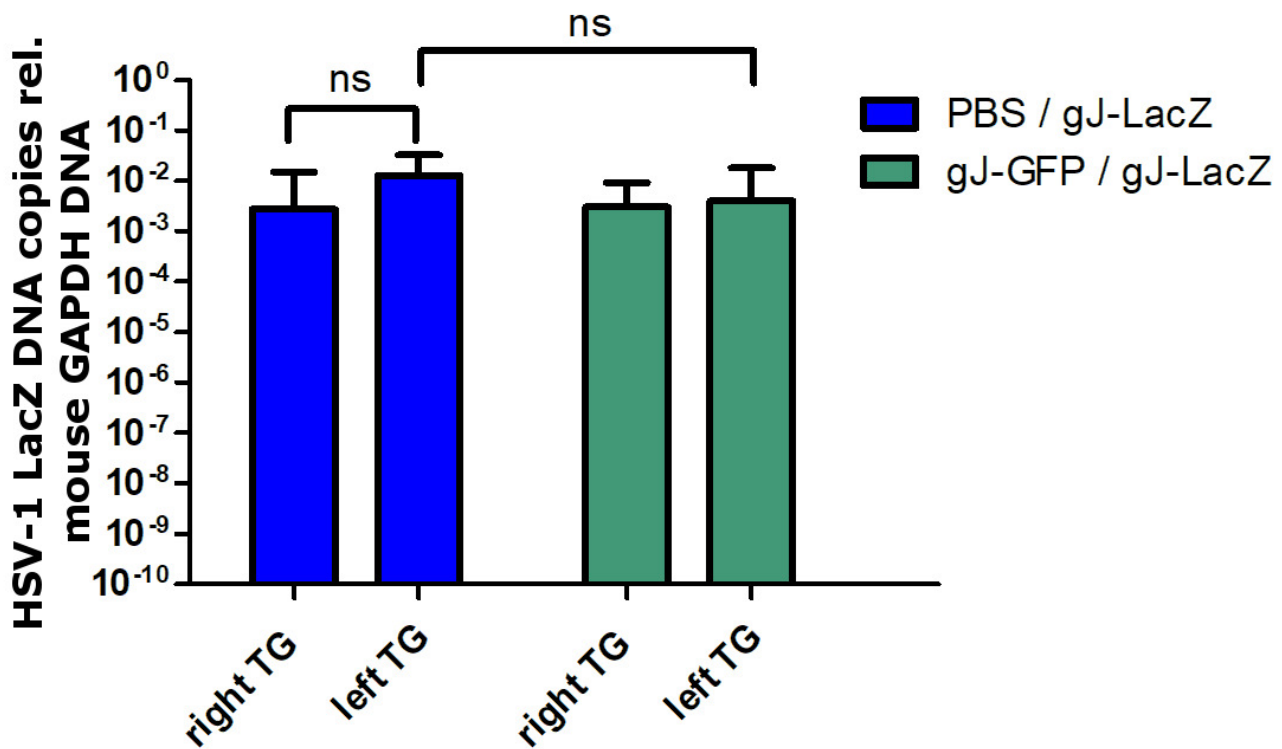


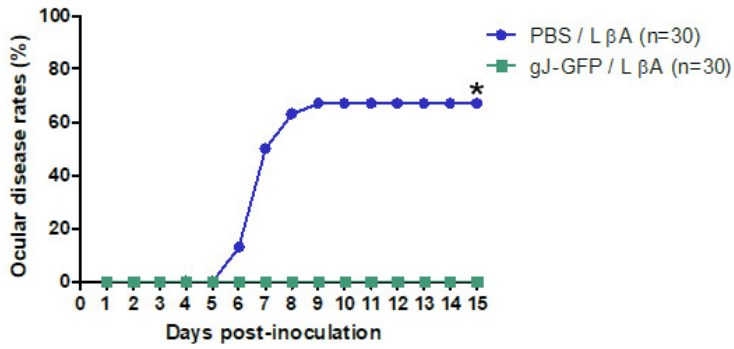
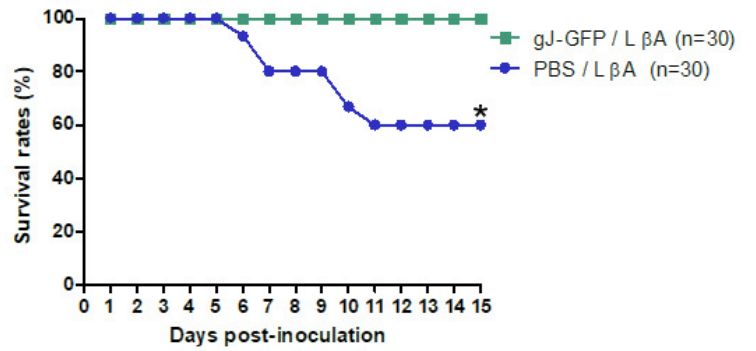
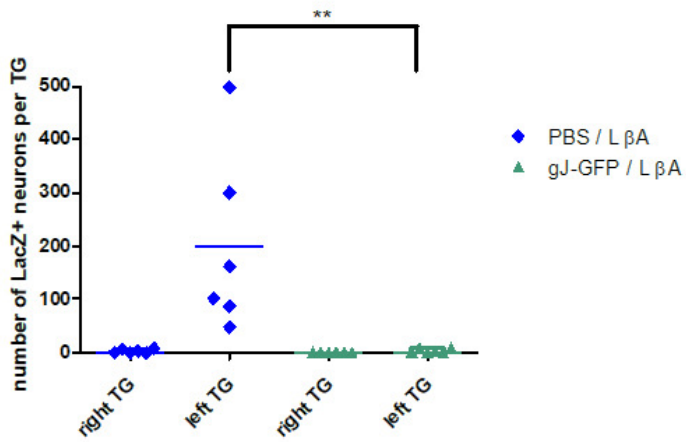
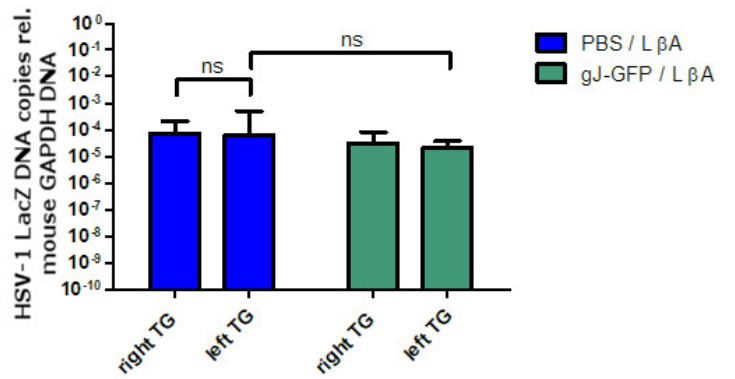


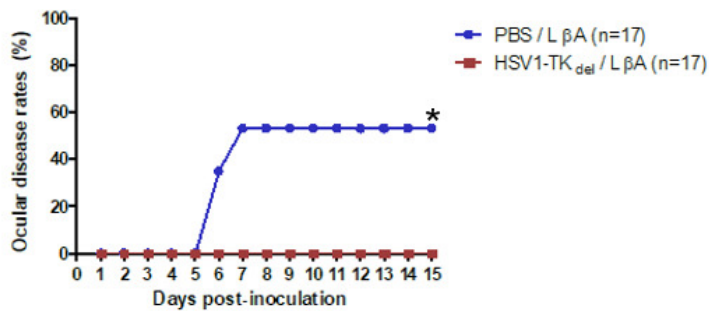
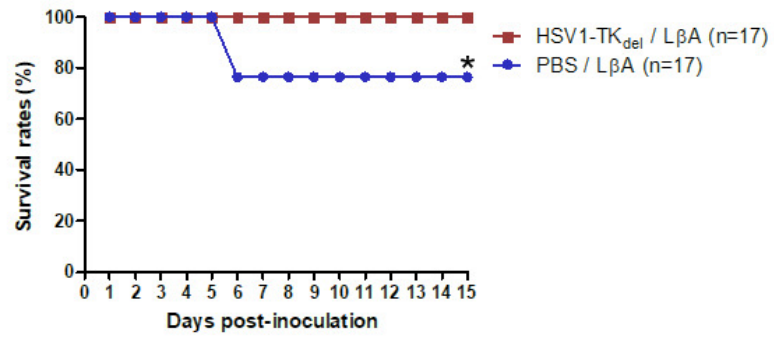
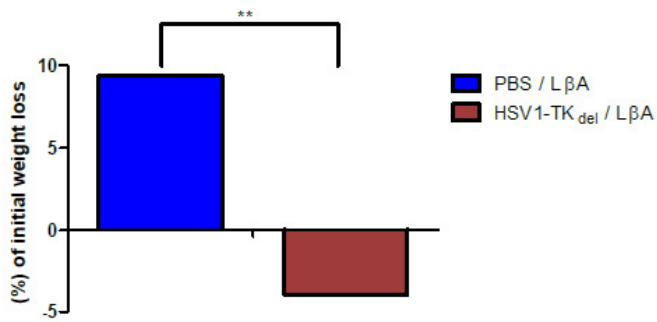
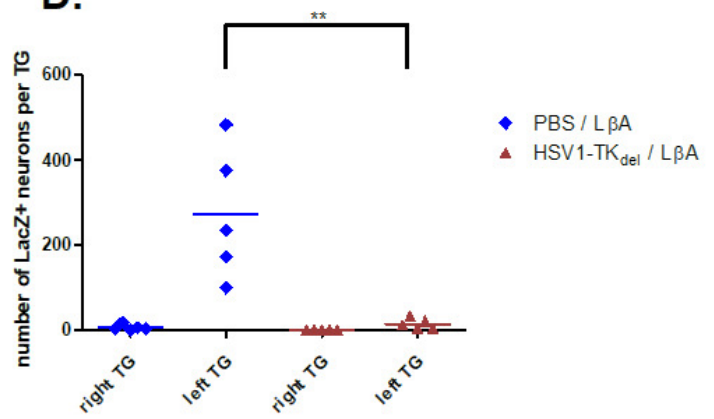
A.

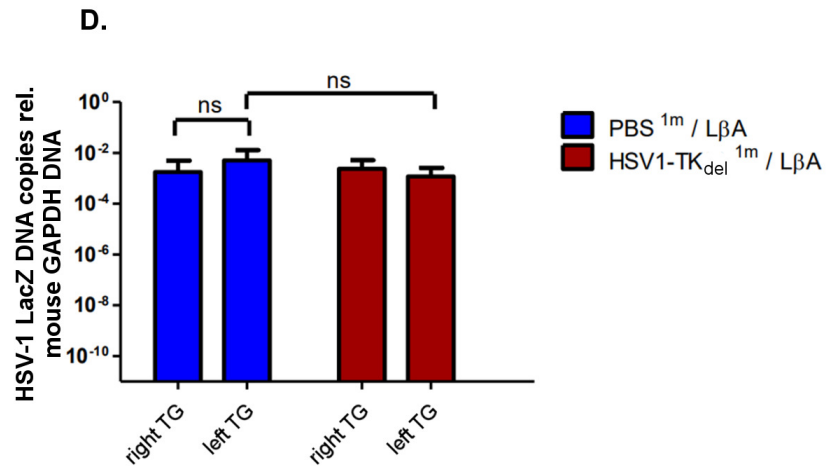
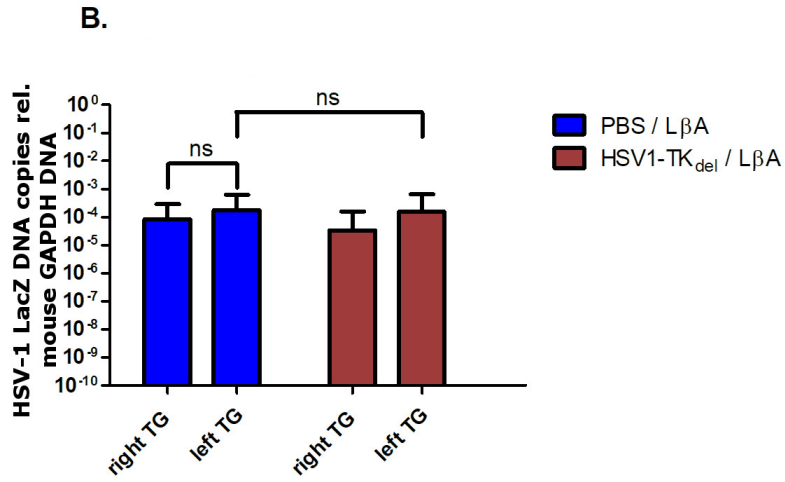
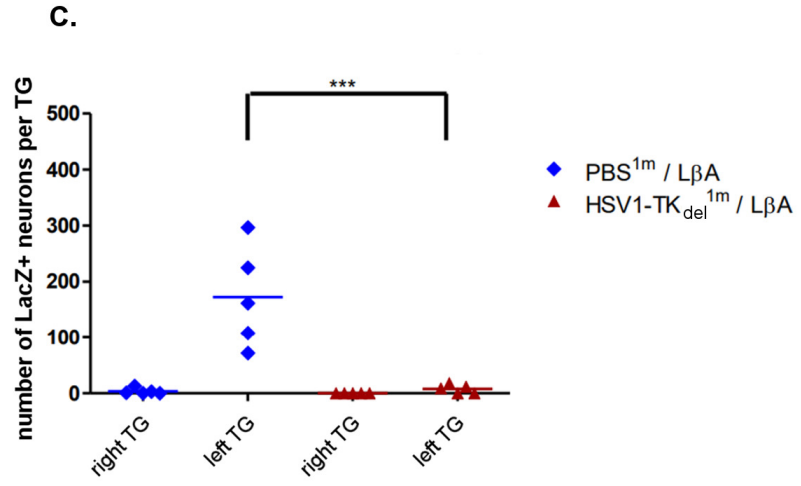
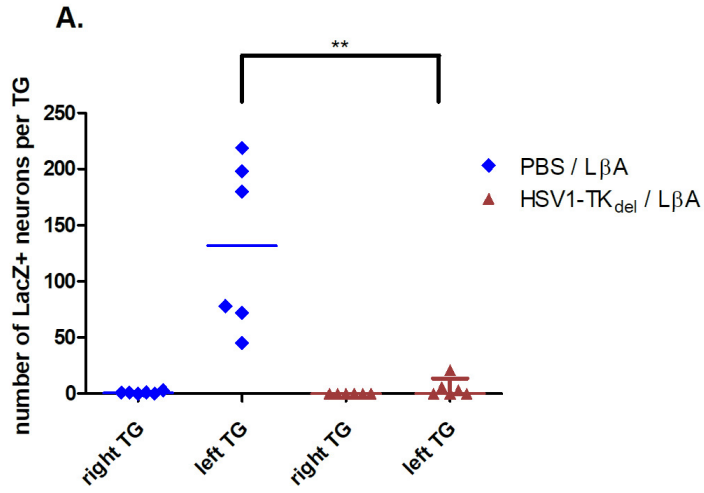


B.

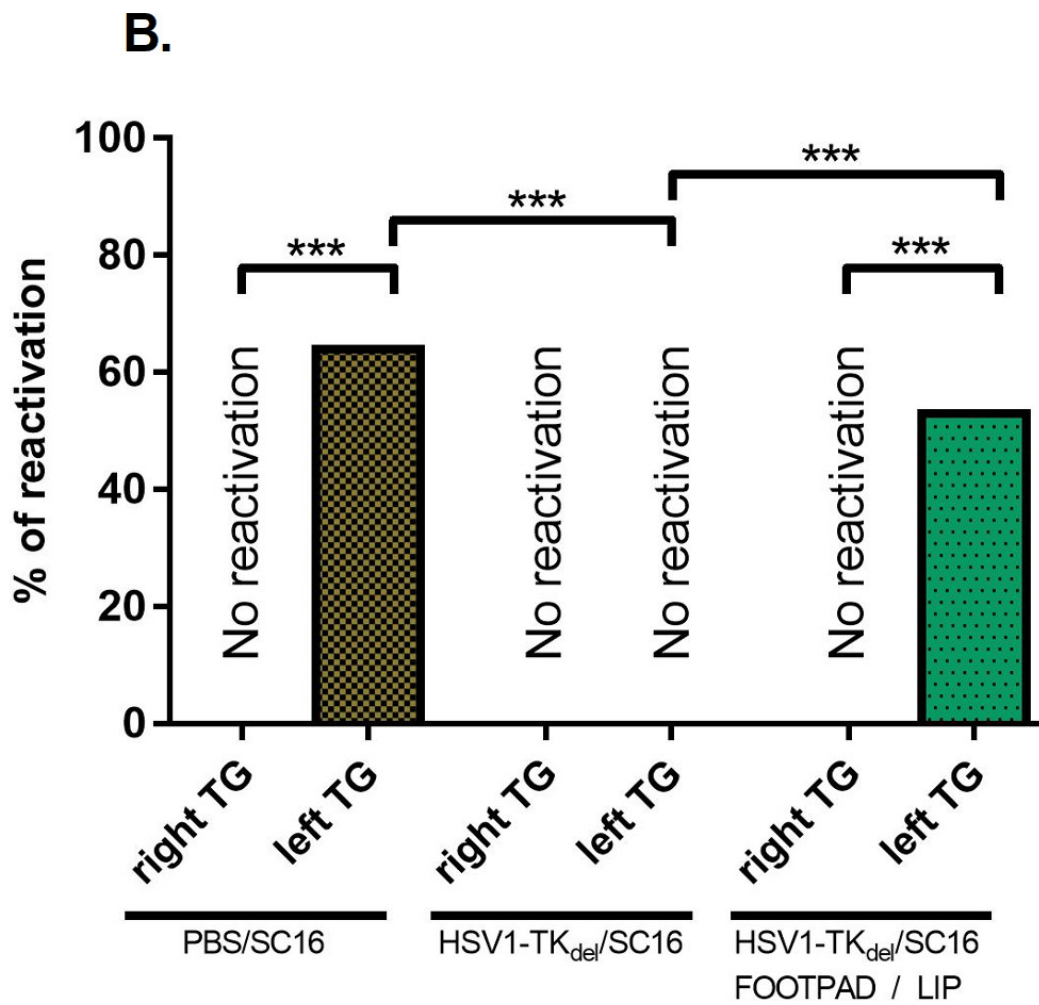
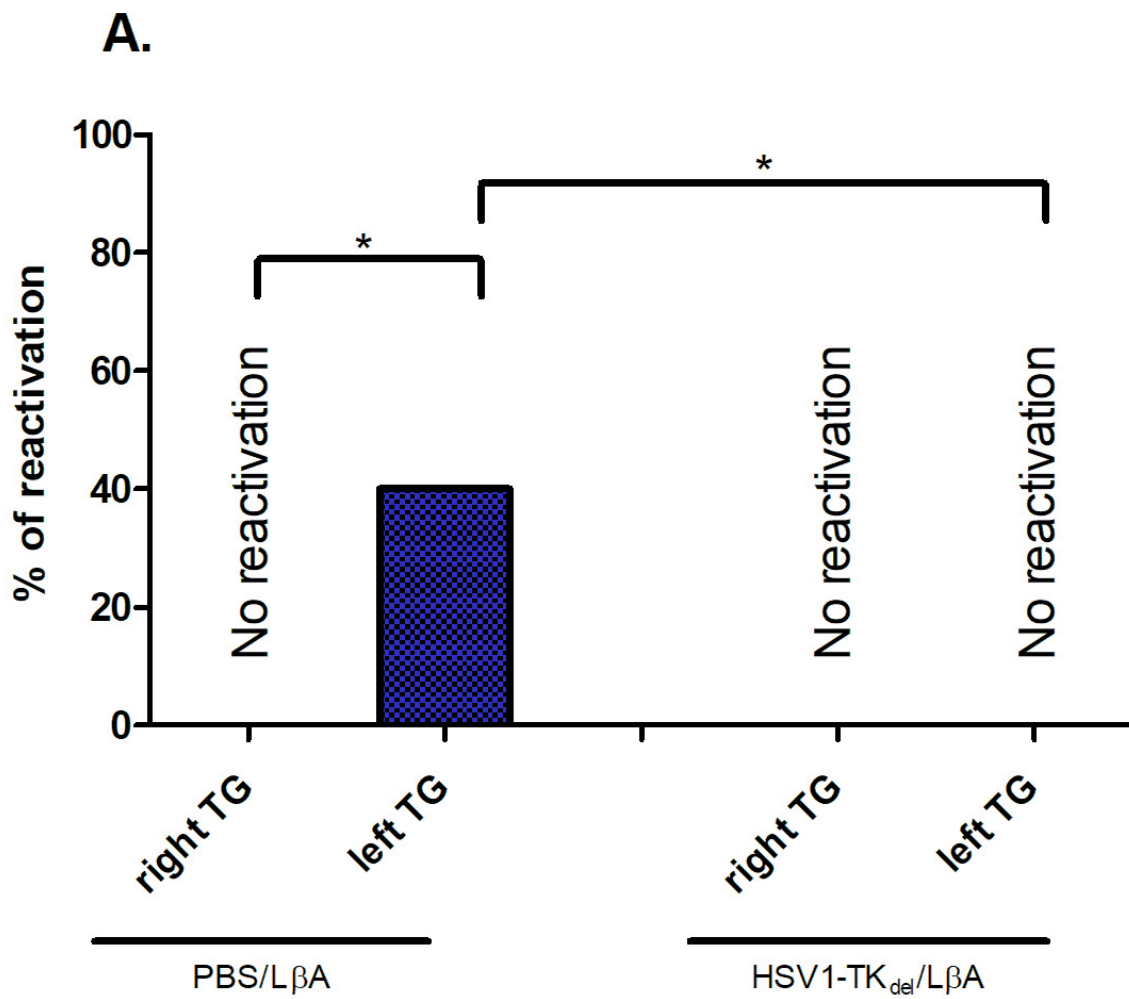


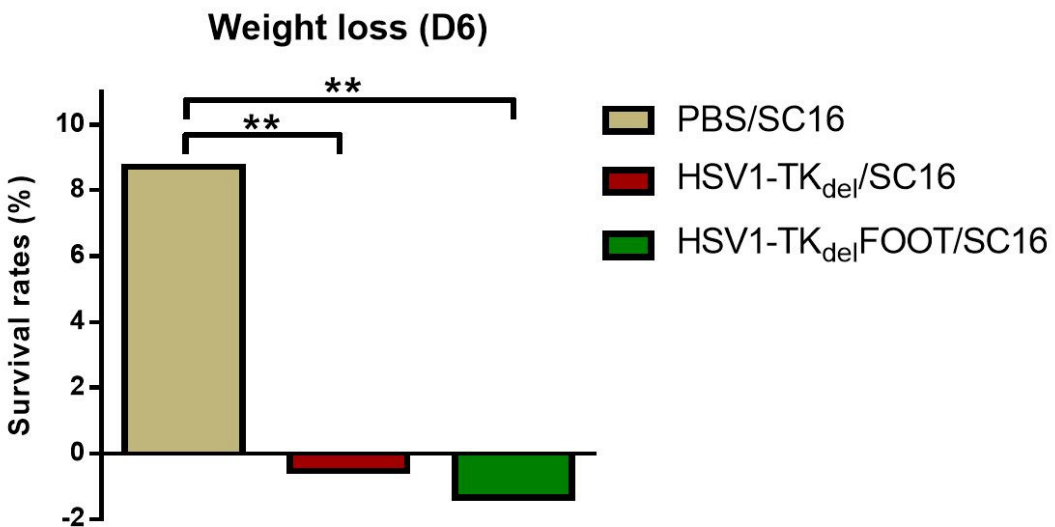
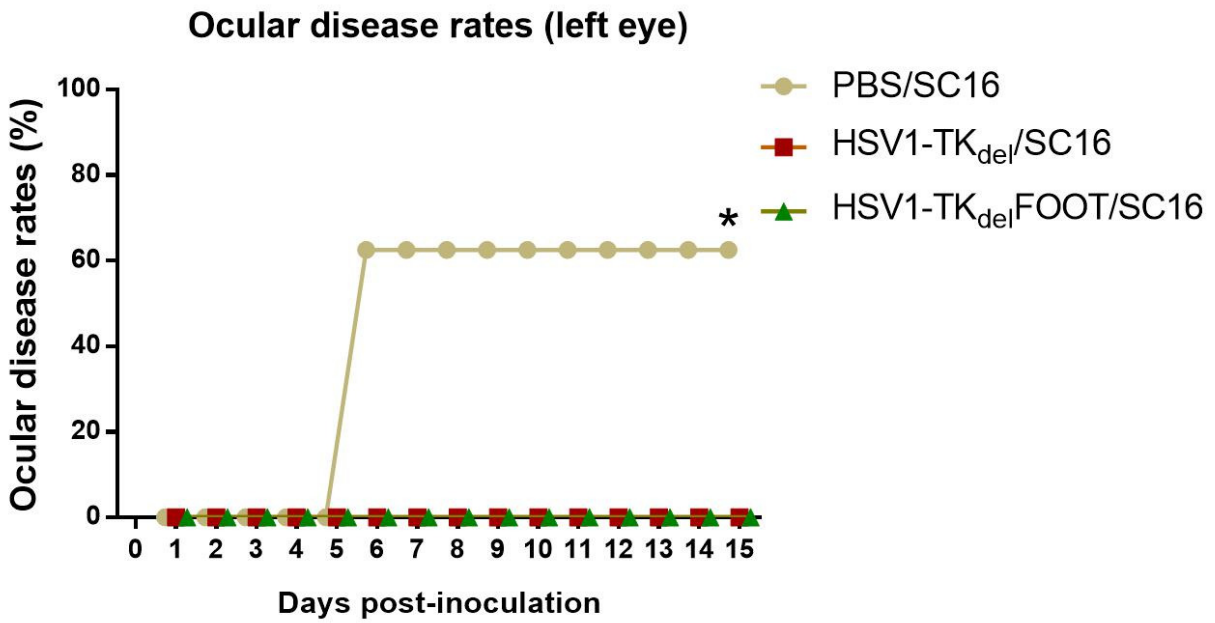
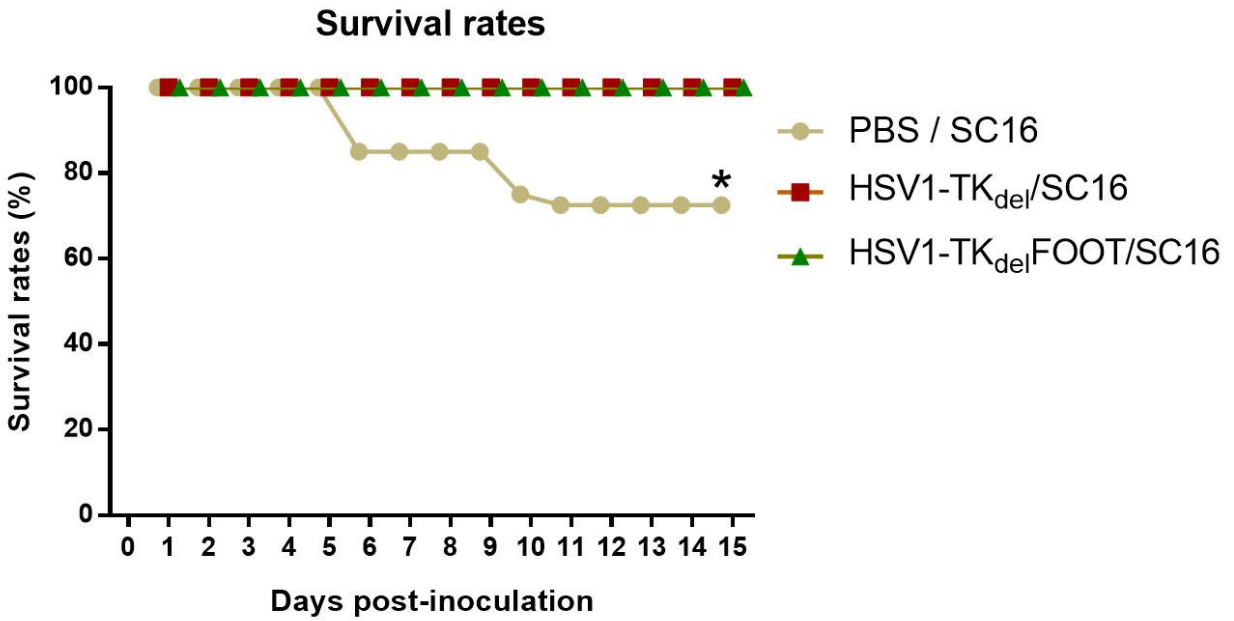
**A.****B.****C.****D.**

**A.****B.****C.****D.**









**Article 2 :** Local immune alterations associated with a non-neurovirulent modified strain of HSV-1-mediated protection in a oro-ocular model of HSV-1 disease.



1 **Local immune alterations associated with a non-neurovirulent modified strain of**  
2 **HSV-1-mediated protection in a oro-ocular model of HSV-1 disease.**

3

4 ROUSSEAU A<sup>1,2</sup>, LEGRAND R<sup>1</sup>, PALGEN JL<sup>1</sup>, LEMAITRE J<sup>1</sup>, DEBACK C<sup>3</sup>,  
5 LOMONTE P<sup>4</sup>, LABETOULLE M<sup>1,2</sup>, HAIGH O<sup>2</sup>

6

7 1) CEA - Université Paris Sud, INSERM U1184, Immunology of Viral Infections and  
8 Autoimmune Diseases, IDMIT department, IBFJ, 92265, Fontenay-aux-Roses, France.

9 2) Université Paris Sud, Centre Hospitalier Universitaire de Bicêtre, Service d'Ophtalmologie,  
10 APHP, DHU Vision & Handicaps, Centre de référence maladies rares en ophtalmologie  
11 OPHTARA, Le Kremlin-Bicêtre, France.

12 3) Université Paris Sud, Hôpital Paul Brousse, Service de Virologie, APHP, Villejuif, France.

13 4) Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS UMR 5310, INSERM U 1217, LabEx DEVweCAN,  
14 Institut NeuroMyoGène (INMG), team Chromatin Assembly, Nuclear Domains, Virus, Lyon,  
15 France.

16

17

18

19

20

21 **Total word count: 10290**

22 **Abstract word count: 299**

23

24

25

26

27 **Corresponding author's address**

28 Marc Labetoulle

29 Service d'ophtalmologie, Hôpital de Bicêtre

30 78, rue du Général Leclerc, 94275 Le Kremlin Bicêtre

31 phone: +33 1 45 21 36 90

32 fax: +33 1 45 21 22 46

33 **Keywords:** HSV-1; latency; reactivation; trigeminal ganglion; neurons; superinfection; keratitis

34 **ABSTRACT**

35           In humans, Herpes simplex virus type 1 (HSV-1), primary infection occurs in the oral  
36 mucocutaneous tissues. Virions replicated here penetrate sensitive neuronal axons, migrate  
37 to both trigeminal ganglion (TG) where it established a lifelong latency. Reactivations of HSV-  
38 1 in the TG neurons induce clinical recurrences in the connected peripheral tissues. This  
39 process is involved in herpes simplex keratitis (HSK), a condition that, strikingly, occurs almost  
40 exclusively in the same eye for a given patient. Based on an experimental oro-ocular (OO)  
41 model of HSV-1 infection, we previously demonstrated that a virus inoculation on one side of  
42 the mouth, leads to viral replication in the lip, followed by HSK. Virus concomitantly  
43 disseminates to both TG, but reactivation only occurs in the TG ipsilateral to the inoculation  
44 site. We also observed that after a primary inoculation with a non-neurovirulent strain of HSV-  
45 1 in one lip, mice are protected against both acute phase disease and reactivation after a  
46 superinfection with a fully virulent wild-type strain of HSV-1 in the contralateral lip. However,  
47 the immune mechanisms involved in this protective state remains to be elucidated.

48           Here, we combined high resolution flow cytometry and bead-based immunoassays, we  
49 quantified hematopoietic subsets and inflammatory chemokines in the lips (site of inoculation)  
50 and the TG (site of HSV-1 latency/reactivation). We demonstrated that after a single inoculation  
51 with the wild-type strain, a delayed immune infiltrate, boasting more proinflammatory subsets,  
52 occurred in the lip and persisted in the TG. In contrast, the immune infiltrate occurred earlier  
53 in the superinfected lip and ipsilateral TG, with less inflammatory chemokines but more  
54 adaptive immune subsets. Moreover, cellular infiltrate resolved faster, correlating with  
55 nullification of inflammatory chemokines locally. These data show that the immune response  
56 kinetics influence the development of natural immunity to HSV-1, and can be harnessed to  
57 protect against disease and reactivations.

58

59

60

61

62

## 63 INTRODUCTION

64 Herpes simplex virus type 1 (HSV-1) is a human neurotropic virus that is characterized  
65 by its capacity to alternate between phases of latent infection and reactivations (Kaye and  
66 Choudhary, 2006). A 40-year population survey has shown that HSV-1 primary infection  
67 almost always occurs in the oral mucocutaneous tissues (Liesegang, 1989), where the first  
68 contact of HSV-1 with the host immune system occurs. HSV-1 pathogen associated molecular  
69 patterns (PAMP) are detected by pattern recognition receptors (PRR) (Melchjorsen, 2012),  
70 trigger inflammatory responses and recruit immune cells (Conrady et al., 2013; Vogel et al.,  
71 2014; Dai and Caligiuri, 2018; Handfield et al., 2018). The latter are directed to work in concert  
72 to inhibit viral replication by eliminating infected cells, inactivating viral particles, and further  
73 shaping the immune response (Eyerich et al., 2018; Handfield et al., 2018). Meanwhile, HSV-  
74 1 antigens are transported to lymph nodes by dendritic cell (DC) relay (Lee et al., 2009; Kim  
75 et al., 2015), where T cell responses are primed (Whitney et al., 2018). After infection, “armed”  
76 effector T cells are actively involved in immunosurveillance, where they can respond to kill  
77 infected cells and clear infection (Coles et al., 2002; van Lint et al., 2004).

78 Concomitantly, viral particles produced in the site of the primary infection can penetrate  
79 sensitive neuronal axon termini situated in the oral mucocutaneous tissue, and are transported  
80 to the trigeminal ganglia (TG), which is responsible for the sensory innervation of the face  
81 (Smith et al., 2001). There, the virus can either replicate in the neurons somata and continue  
82 its propagation to the second order neurons (located in the brainstem) and third order neurons  
83 (including those of the contralateral TG), or can enter a latent stage of infection, which can  
84 persist for the life of the host. Immune control mechanisms, involving complex innate and  
85 adaptive mechanisms, are implicated in the maintenance of this latent state (Decman et al.,  
86 2005; Catez et al., 2012; van Velzen et al., 2013a; Maroui et al., 2016).

87 However, HSV-1 latency can be interrupted by one or several episodes of viral  
88 reactivation. In this case, viral particles can migrate in the axons of the neuron harboring the  
89 reactivation process, and reach the corresponding peripheral tissues where they can replicate  
90 more widely, leading to the clinical signs of herpetic recurrences (Kaye and Choudhary, 2006).  
91 This latency-reactivation cycle explains herpetic recurrences in the cornea (HSV-1 keratitis,

92 HSK), a sight-threatening condition that, strikingly, occurs almost exclusively in the same eye  
93 for a given patient despite latent HSV-1 DNA loads found in both left and right TG (Cohrs et  
94 al., 2000; Motani et al., 2006; Richter et al., 2009). HSK affects 12-30/100 000 patients  
95 (Labetoulle et al., 2005; Kaye and Choudhary, 2006), with a risk of visual impairment  
96 increasing with the number of HSK episodes (Liesegang, 1989; Young et al., 2010). Even  
97 during the quiescent phases of disease, HSK significantly impairs the quality of life of patients  
98 (Reynaud et al., 2017) due to persistent visual abnormalities (Kaswin et al., 2013) and/or ocular  
99 surface dysregulation (M'Garrech et al., 2013). HSK episodes can be treated by with HSV-1  
100 DNA polymerase inhibitors, which effectively block viral replication during acute episodes  
101 (Kaye and Choudhary, 2006). However, prevention of HSK recurrences in the affected patients  
102 remains an unmet need with the current available therapeutic options: antiviral drugs can be  
103 used as a long-term treatment but they reduced the rate of recurrences by only 50% with  
104 regimen approved by health authorities (Wilhelmus et al., 1998), and their chronicle use may  
105 trigger the emergence of antiviral-resistant strains (van Velzen et al., 2013b; Rousseau et al.,  
106 2017). Therefore, developing new preventive strategies to combat HSV-1 recurrences is  
107 necessary. Vaccine strategies exploiting recombinant subunits or live attenuated viruses have  
108 been shown to protect against acute phase disease in animal models by eliciting immune  
109 responses that control viral replication (Iyer et al., 2013; Royer et al., 2016), but they failed to  
110 achieve significant efficacy in clinical trials (Johnston et al., 2016). For these reasons, new  
111 therapeutic tools, likely based on a immune control of the virus, remain to be developed, and  
112 for that purpose, the choice of the experimental conditions may make the difference.

113 Most commonly, immunological studies of HSK are performed in corneal scarification  
114 models (Knickelbein et al., 2007; Royer et al., 2016; Lee and Ghiasi, 2017), while the eye is  
115 considered an immune privileged site (Knickelbein et al., 2007; Taylor and Ng, 2018; Lee et  
116 al., 2019), and does not provide the same kinetics of viral spread to the eye as inoculation at  
117 the oral mucocutaneous tissue, a professional tissue for eliciting antiviral responses (Levin et  
118 al., 2015; Handfield et al., 2018). Thus, it is possible that immune conditions in HSK could differ

119 substantially from those elicited experimentally by corneal scarification, and this may influence  
120 disease outcomes (Cavallero et al., 2014).

121 We previously described an oro-ocular (OO) murine model of HSV-1 infection which  
122 may circumvent most of these pitfalls. After inoculation of HSV-1 at the mucocutaneous tissue  
123 of the mouth, virus replication occurs at the site of inoculation for up to 4 days, while at day 4  
124 (D4), viral replication is observed in the TG ipsilateral to lip infection and by D6 in the  
125 contralateral TG (Labetoulle et al., 2000a; Labetoulle et al., 2003). Concomitantly, from D6,  
126 60% of mice develop HSK (which spontaneously resolves at D10), but only in the eye ipsilateral  
127 to the inoculation site, and all these animals are eventually latently infected in the both TGs  
128 (Labetoulle et al., 2003; Maillet et al., 2006). Using the explant method, a very sensitive  
129 technique to induce HSV-1 reactivation, we observed that reactivations occur from ~50% of  
130 the TGs from TG ipsilateral to lip inoculation, but not in the other (contralateral) TG, a feature  
131 that is similar to the clinical observations made in HSK patients.

132 This unilateral restriction of virus activity and potential reactivation is related to the  
133 kinetics of viral spread from the lip to the ipsilateral TG (Labetoulle 2003), and likely the  
134 immune reaction elicited by the primary infection. Indeed, when mice are pre-challenged with  
135 a non-neurovirulent strain of HSV-1 (TK<sub>del</sub>) in the right lip 4 days (or more) before virulent wild  
136 type superinfection in the left lip, acute ocular disease signs, viral replication in both TG and  
137 even reactivations are completely inhibited (Poccardi et al., 2019).

138 In the present study, we questioned how kinetics of HSV-1 infection in the lip would  
139 influence immune responses, to uncover immune features that could be responsible for the  
140 protection observed in our model. We used high definition flow cytometric analysis (Yu et al.,  
141 2016) and bead-based immunoassays, to define changes in immune infiltrate and  
142 inflammatory chemokines that occurred at key sites (lip and TG), after viral inoculation in the  
143 lip. We compared tissues from mice that received a single inoculation in the left lip with a  
144 virulent wild-type of HSV-1, which induces ocular disease and potential reactivation, versus a  
145 superinfection regimen (initial inoculation with TK<sub>del</sub> in the right lip, followed by superinfection  
146 with a the wild-type HSV1 strain in the the left lip, separated by a 4 days interval), which confers  
147 the protection described above. We identified changes in kinetics and magnitude of immune



148 cell infiltrate and chemokines at the lip and TG, which may explain the unilateral-restricting  
149 disease by initial lip infection and also bilateral protection that occurred after lip infection with  
150 TK<sub>del</sub>.

151

## 152 **METHODS**

### 153 **Virus strains and cells**

154 Viruses used include the wild-type SC16 strain of HSV-1 (Hill et al., 1975), and the  
155 HSV-1 SC16 mutant TKDM21 (termed TK<sub>del</sub>), encoding a deletion of 816-bp within the  
156 Thymidine Kinase (TK) coding region (Efsthathiou et al., 1989). Using the VERO cell line,  
157 viruses were propagated and titrated as previously described (Labetoulle et al., 2000a).

### 158 **Inoculation procedures**

159 Female BALB/c mice (Janvier Breeding, Le Genest-Saint-Isle, France), housed with  
160 unrestricted access to food and water, were used for experiments at 6 weeks of age. Infections  
161 were performed below the epithelium of the upper lip of mice as previously described  
162 (Labetoulle et al., 2000b), to administer 1  $\mu$ L volumes of  $1 \times 10^6$  plaque-forming-units (PFU) of  
163 virus diluted in PBS. One microliter of PBS was administered for mock inoculations. Initial  
164 infections with TK<sub>del</sub> occurred in the right lip, while all other virus inoculations and mock, were  
165 administered in the left lip. Uninfected mice ( $n = 4$  per group) were randomly sacrificed at D0,  
166 and infected mice ( $n = 4$ , per time point, per group) on D2, D4, D6, D10 (acute phase) and  
167 D28, which corresponds to early stage of latent infection in our model (Cavallero et al., 2014).  
168 For superinfected group, D0 corresponded to the day of superinfection. All procedures  
169 involving experimental animals conformed to ethical standards of the Association for Research  
170 in Vision and Ophthalmology (ARVO) Statement for the use of animals in research and were  
171 approved by the local ethics committee (CEEA 59).

### 172 **Sample collection**

173 Specimens of the upper left and right lip, approximately  $2 \times 2 \times 2$  mm and  
174 encompassing the site of infection, were harvested just internal to the labial commissures, after  
175 which left and right TG were harvested from the same animals.

### 176 **Detection of immune infiltrate by multiparameter flow cytometry**

177 Cell suspensions were prepared by initially mincing with Vannas scissors (Beaver  
178 Visitec International, Eybens, France) and digestion with collagenase type IV  
179 (Scima/Worthington Chemicals) and DNase I from bovine pancreas (Sigma-Aldrich, St  
180 Quentin Fallavier, France) (Gelderblom et al., 2009; Legroux et al., 2015). To separate myelin  
181 from cells, 37% Percoll Plus (GE Healthcare, Chicago, USA) was used (Legroux et al., 2015),  
182 after which cells were resuspended in flow cytometry staining buffer (PBS + 2% fetal calf  
183 serum). Cells were labelled with a previously defined antibody panel, previously described to  
184 study immune infiltrate into non-lymphoid tissues (Yu et al., 2016), and modified to include  
185 anti-mouse CD3 PE-Cy7 (Fischer Scientific), anti-mouse CD4-BUV395 (BD Biosciences) and  
186 anti-mouse CD8 $\alpha$ -PE-CF594 (BD Biosciences). Equal numbers of true count beads were  
187 added to each tube to enable absolute cell counting. Samples acquisition was performed using  
188 a FORTESSA X20 flow cytometer (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France), with a 5-laser  
189 and 20-filter configuration. Immune populations were defined using a modified strategy to that  
190 previously published by Yu *et al.*, (Yu et al., 2016), with the addition of a single cell gate, bead  
191 gating and including CD3, CD4 and CD8 analysis of the T cell population using Flowjo v10.0.  
192 Raw data was extracted for analysis using Microsoft Excel 2016. Figures were generated using  
193 Prism v7.00 (Graphpad) and GIMP v2.

#### 194 **Quantification of inflammatory chemokines in lip and TG samples by bead-based** 195 **immunoassay**

196 Lip and TG samples were collected from mice ( $n = 4$  per group, per time point) in non-  
197 denaturing 4.7  $\times$  cell lysis buffer (Cell Signaling Technologies, USA) with 1 mM PSMF (Sigma-  
198 Aldrich, France) freshly added immediately prior to harvesting. Tissues were homogenised in  
199 CKmix tubes (BertinPharma, Montigny-le-Bretonneux, France) at 6,500  $\times$  RPM for 45 seconds  
200 using the Precellys24 (BertinPharma, France). Tissue homogenates were clarified at 10,000  
201  $\times$  g for 5 mins at 4°C and frozen at -80°C. Mouse proinflammatory chemokines LEGENDplex  
202 assay (Biolegend, France) was performed according to manufacturers' instructions with 2-fold  
203 diluted samples. Data acquisition was performed using a FORTESSA X20 flow cytometer  
204 (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France) to acquire 4000 beads/sample, and  
205 LEGENDplex v.8.0 software was used to calculate the chemokine concentrations from tissue

206 samples by comparison with standard curves. Standard curves achieved  $r$  values of no lower  
207 than 0.995, and all samples with chemokines detected fell within the standard curve. Microsoft  
208 Excel 2016 was used to collate the data for statistical analysis, while Graphpad Prism and  
209 GIMP v2 were used to generate figures.

### 210 **Cytology comparison of immune infiltrate of lip and TG tissues**

211 Cell suspensions of left lip ( $n = 3$ ) or left TG ( $n = 3$ ), harvested 6 days after inoculation  
212 with SC16 were labelled with: Live/Dead Aqua (Life Technologies, Invitrogen), PE anti-mouse  
213 CD11b, and APC-eFluor700 anti-mouse CD45. CD11b<sup>+ve</sup> and CD11b<sup>-ve</sup> populations were  
214 sorted into FCS using a FACSAria I (Becton Dickinson, Le Pont de Claix, France) with FACS  
215 Diva v6. Sorted population were attached to Superfrost Plus microscope slides (Thermo  
216 Scientific, France) and stained by May-Grünwald Giemsa procedure. Images were captured  
217 randomly using Nikon Eclipse 80i with Dxm 1200C digital camera at 60× magnification. Cells  
218 were identified and enumerated by morphological criteria by a trained cytologist.

### 219 **Statistical analyses**

220 Statistical analysis was performed with R version 3.2.0. (RDC, 2011). Cell numbers  
221 were compared using the *exactRankTests* permutation test, chemokines' concentrations using  
222 the *Student's t-test*, and infiltrate frequencies using the non-parametric *Kruskal-Wallis test*.  
223 Statistical significance was indicated by  $p < 0.03$  (2-tailed).

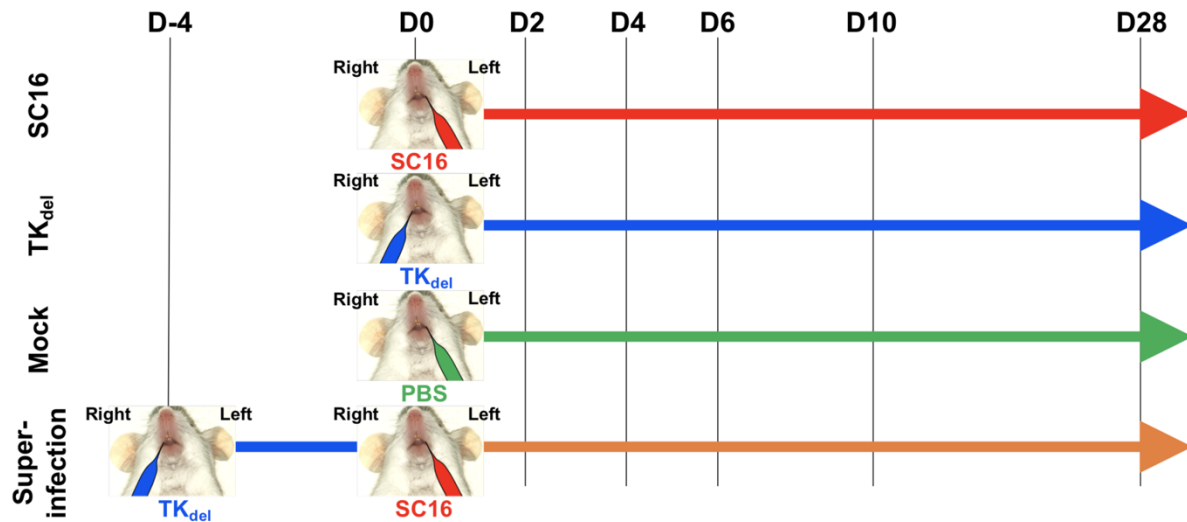
224

## 225 **RESULTS**

### 226 **Identifying immune subset infiltrate into sites of acute HSV-1 replication**

227 To help understand the role of immune mechanisms that develop in our model to  
228 protect against disease, groups of mice ( $n = 26$  mice per group) were infected in the lip with:  
229 virulent HSV-1 SC16 wild-type strain (**SC16**; *in left lip*), sterile PBS (**Mock**; *in left lip*), or TK<sub>del</sub>  
230 (TK<sub>del</sub>; *in right lip*) at D0 (**Figure 1**). A 4<sup>th</sup> group was initially infected with TK<sub>del</sub> in the right lip at  
231 D-4, and 4 days later (D0) superinfected in the left lip with SC16 (**Superinfection**).

232

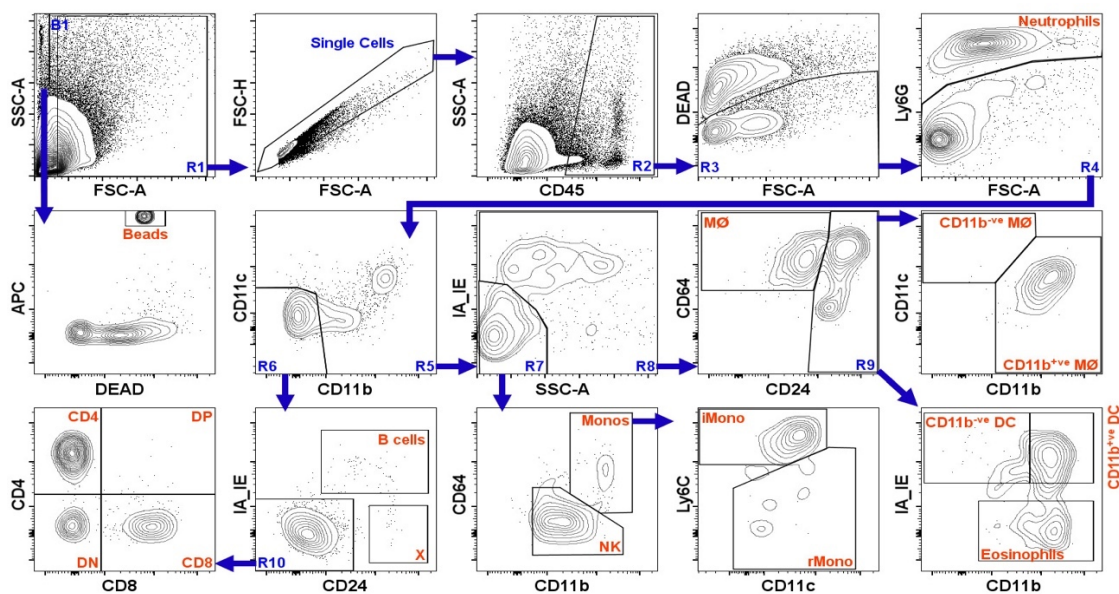


233

234 **Figure 1:** Schematic representation of the experimental procedure and time course. Single viral  
 235 inoculation consisted in HSV-1 wild strain SC16 (upper left lip) or non-neurovirulent TK<sub>del</sub> (upper right  
 236 lip) injection in the left lip at D0. Mock inoculation consisted of PBS injection in the upper left lip. In the  
 237 “Superinfection” group, TK<sub>del</sub> was injected in the upper right lip 4 days prior (D-4) to SC16 injection (D0).  
 238 Four mice per group were randomly sacrificed at days 0, 2, 4, 6, 10 and 28 and sampled for left and  
 239 right lips and TGs. D = day.

240

241 Immune infiltrates were categorised in the lip and TG using a flow cytometry technique  
 242 designed to study haematopoietic cells in non-lymphoid tissues under inflammatory conditions  
 243 (Yu et al., 2016). By customising the protocol to include CD4- and CD8-specific antibodies,  
 244 and including cytometry counting beads for quantifying cell numbers, we were able to identify  
 245 and quantify haematopoietic subsets with precision (**Figure 2**).

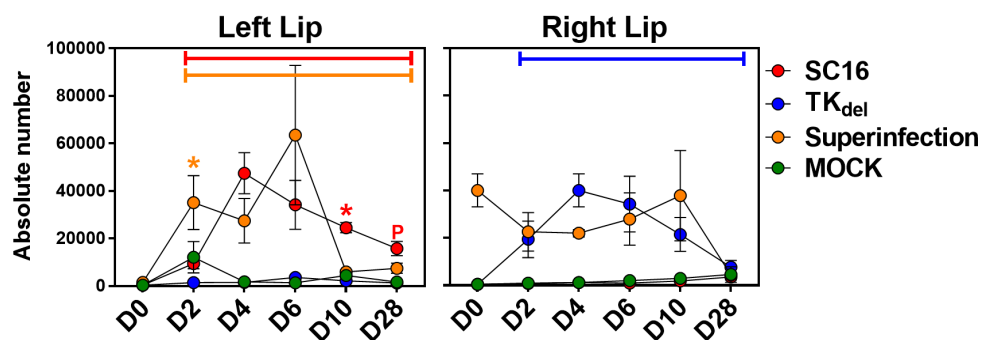


246

247 **Figure 2:** Contour plots and gating strategy used for the identification of immune cell population in lip  
 248 and TG tissues, modified from Yu et al. (Yu et al., 2016). The immune subsets include neutrophils,  
 249 monocytes including inflammatory (iMono) and resident monocytes (rMono), CD4<sup>+ve</sup>, CD8<sup>+ve</sup> and double  
 250 negative (DN) T cell T cells, B cells, NK cells, CD11b<sup>+ve</sup> and CD11b<sup>-ve</sup> dendritic cells, macrophages,  
 251 eosinophils and an undetermined population (X).

252 **Immune infiltrate appears earlier and is cleared faster in SC16-superinfected lip**

253 To determine if immune responses were altered at the site of inoculation, we first  
 254 quantified the global immune cell infiltrate into infected lip tissues by enumerating the number  
 255 of CD45<sup>+</sup>ve cells present in samples over time. CD45<sup>+</sup>ve cells increased in lip tissue significantly,  
 256 by comparison with uninfected D0 lip, by D2 in all groups (**Figure 3**). However, while CD45<sup>+</sup>ve  
 257 cell numbers in SC16-infected lips were comparable to those in mock-infected lips at D2, the  
 258 numbers in SC16-superinfected lips increased to a much greater extent, reaching peak levels  
 259 at this time. In contrast, TK<sub>del</sub>-infected and SC16-infected lip infiltrating CD45<sup>+</sup>ve cells kept  
 260 increasing to peak at D4. CD45<sup>+</sup>ve cells in SC16-superinfected lip decreased to numbers similar  
 261 to those of mock-infected lips by D10 and remained at D28 (a point when latent state of  
 262 infection is established (Labetoulle et al., 2003; Cavallero et al., 2014)). On the contrary, TK<sub>del</sub>-  
 263 infected and SC16-infected lip CD45<sup>+</sup>ve cells persisted until D10 (a point when cells positive for  
 264 lytic viral gene expression had become undetectable (Labetoulle et al., 2000c)). Furthermore,  
 265 at D28, CD45<sup>+</sup>ve cell numbers continued to persist in SC16-infected lip tissues and were  
 266 detected at levels 40 times higher than those of the naïve lip at D0. These results demonstrated  
 267 that a more rapid recruitment of immune cells occurs into the site of SC16 superinfection, i.e.  
 268 when preceded 4 days earlier by a contralateral lip infection with TK<sub>del</sub>. This immune infiltrate  
 269 subsided by D10 in the superinfected lip, whereas infiltrate into SC16-infected lip peaked at  
 270 D4 and persisted at the site of SC16 infection into latency.



271  
 272 **Figure 3:** CD45<sup>+</sup>ve immune infiltrates (absolute number of cells) in the lip over time in the different  
 273 experimental protocols. Single SC16 or TK<sub>del</sub> inoculations induce an immune infiltrate that peaks at D4  
 274 and persists until D10. Upper coloured bars indicate significant difference from uninfected D0. Orange  
 275 asterisk indicates a significant difference for Superinfection group compared to Mock and SC16 groups,  
 276 and red asterisk indicates a significant difference for SC16 compared to Mock and Superinfection groups  
 277 ( $p < 0.03$ ). Coloured P indicates a significant difference between the color-corresponding group and the  
 278 Mock group.

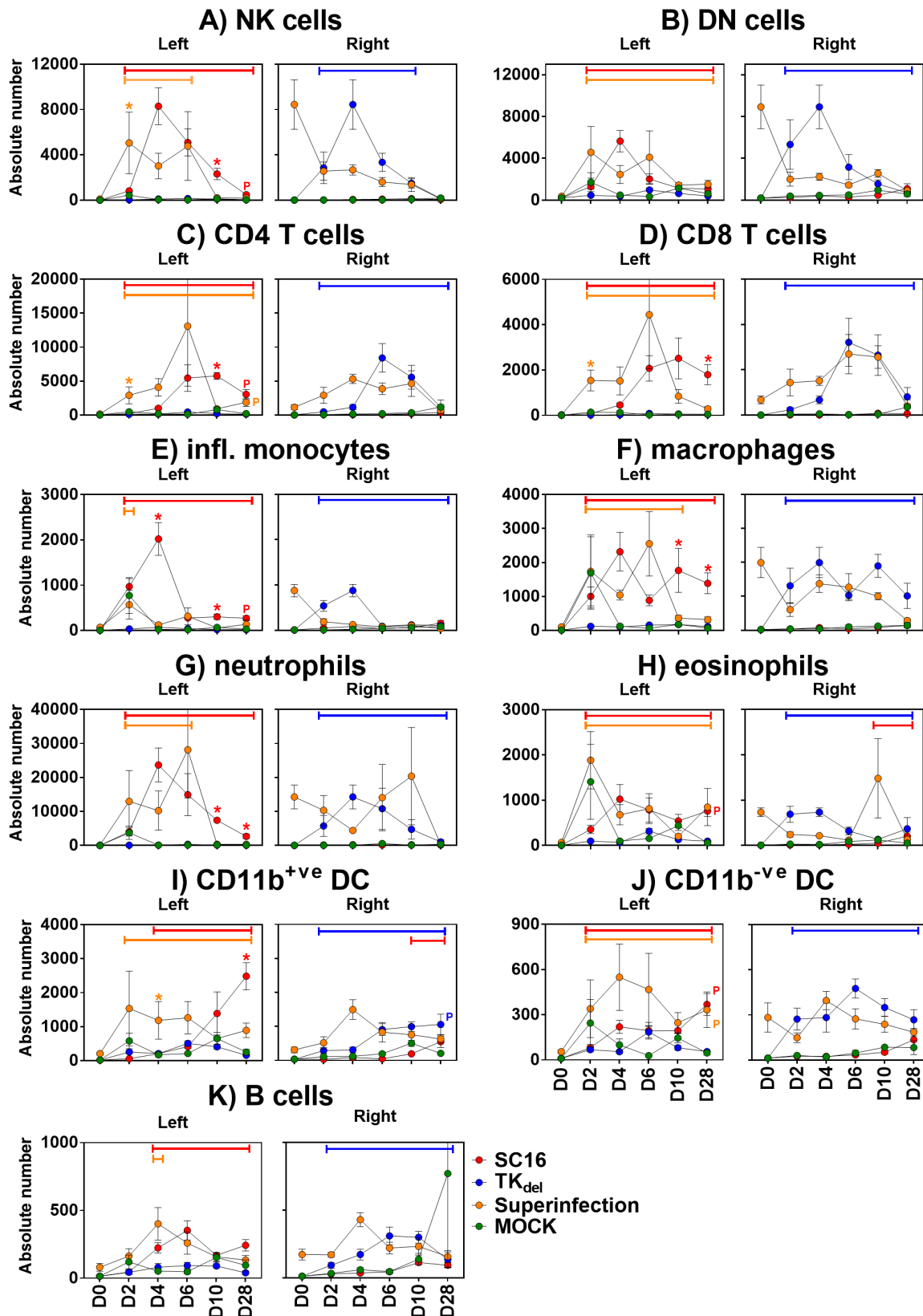
279 **Prior infection with TK<sub>del</sub> induces differences in the types of immune subset at the site**  
280 **of SC16 superinfection**

281 To develop further understanding of how immune dynamics were altered in SC16-  
282 superinfected lip, because of the initial contralateral TK<sub>del</sub> inoculation 4 days prior, we  
283 compared the quantities of specific immune cell subsets in lip tissues of the different groups  
284 after infection (**Figure 4**). Across infected lip tissues, with the exception of B cells and CD11b<sup>+ve</sup>  
285 DC (**Figure 4 I and K**), cell subsets had increased significantly by D2 (**Figure A to H, and J**;  
286 *bar = p < 0.03 vs D0*). However, in mock-infected lips at D2, there were increased numbers  
287 of inflammatory monocytes, macrophages, neutrophils, eosinophils, CD11b<sup>+ve</sup> and <sup>-ve</sup> DC,  
288 which subsided by D4 (**Figure 4 E to J**). In contrast, these populations increased further on  
289 D4 in SC16- and TK<sub>del</sub>-infected lips, but then declined to remain at levels greater than in mock  
290 beyond the late acute phase (D10), and persisted into the latent phase of infection (D28).

291 The greatest changes in immune subset infiltration of SC16-infected left lip occurred  
292 on D4, with most subset numbers peaking at this time, including: NK cells, DN cells,  
293 inflammatory monocytes, macrophages, neutrophils and eosinophils (**Figure 4 A and B, and**  
294 **E to H**). These subsets all commenced a decline by D6 and, excluding DN cells (**Figure 4B**),  
295 persisted from D10 up to D28 at lower, yet significant levels. CD4<sup>+ve</sup> and CD8<sup>+ve</sup> T cells, and B  
296 cells, peaked at D6 and these numbers persisted up to D28 as well (**Figure 4 C, D and K**).  
297 The numbers of CD11b<sup>+ve</sup> and <sup>-ve</sup> DC seemed to increase over the course of the infection, to  
298 reach peak numbers by D28 (**Figures 4 I and J**).

299 There were obvious differences between the immune subset infiltrates into the SC16-  
300 superinfected lip compared to SC16-infected lip. NK cells, CD4<sup>+ve</sup> T and CD8<sup>+ve</sup> T cells had  
301 increased in the SC16-superinfected tissue by D2 (**Figures 4 A, C and D**; *p < 0.03 for all*  
302 *conditions*). In contrast to the infiltrate of SC16-infected lips, these 3 subsets persisted only  
303 until D6 in SC16-superinfected lips, after which they drastically subsided and remained low  
304 from D10 to D28. Macrophage and neutrophil numbers also subsided on D10 and remained  
305 low up to D28 (**Figure 4 F and G**). Furthermore, there was an apparent absence of  
306 inflammatory monocyte infiltrate in SC16-superinfected lip mediated by HSV-1 infection (D4  
307 peak, **Figure 4 E**). CD11b<sup>+ve</sup> DC reached higher numbers in SC16-superinfected lip. However,

308 only at D4 were numbers significantly higher than in SC16- and mock-infected lips (**Figure 4**  
309 **I**;  $p < 0.03$  for both), and they did not increase further but remained consistent until D28. To  
310 summarize, infiltrate enters the site of lip inoculation with HSV-1 by D2, and increases to peak  
311 during acute phase (D4 to D6) with most subsets persisting up to D28. Meanwhile, in SC16-  
312 superinfected lip earlier and greater numbers of NK cells, CD4<sup>+ve</sup> and CD8<sup>+ve</sup> T cells infiltrated  
313 with an absence of inflammatory monocytes during acute phase. Furthermore, infiltration by  
314 most innate immune subsets had resolved by D10, while DC persisted into latency.



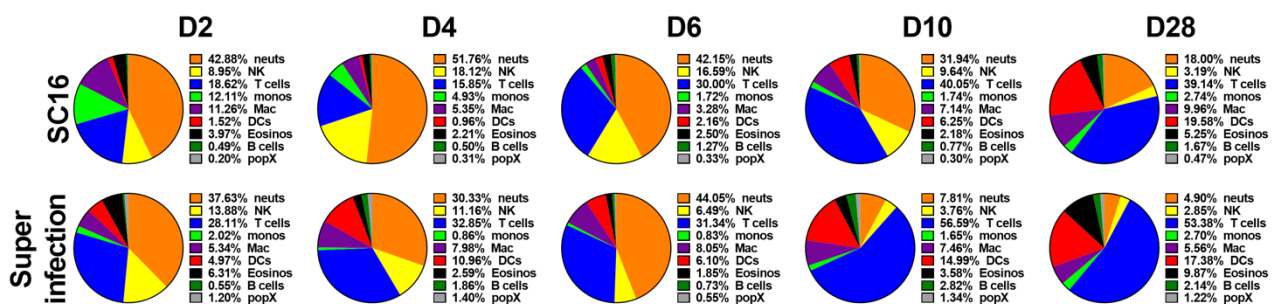
315

316 **Figure 4 A-K:** Immune subsets infiltrates (absolute number of cells) in the lip over time in the different  
 317 experimental protocols. Upper coloured bars indicate significant difference from uninfected D0. Orange  
 318 asterisk indicates a significant difference for Superinfection group compared to Mock and SC16 groups,  
 319 and red asterisk indicates a significant difference for SC16 compared to Mock and Superinfection groups  
 320 ( $p < 0.03$ ). Coloured *P* indicates a significant difference between the colour-corresponding group and  
 321 the Mock group.



322 **Immune infiltrates of SC16-superinfected lip are skewed towards an adaptive response**

323 To confirm that immune infiltrates were altered at the site of SC16-superinfection, we  
 324 compared the relative frequency of immune cell subsets as a proportion of total CD45<sup>+</sup> cells  
 325 with those found in SC16-infected lips (**Figure 5**). While neutrophils remained a common major  
 326 infiltrating population in both SC16-superinfected and SC16-infected lips between D2 to D6,  
 327 their frequency reduced on D10 and D28 in SC16-superinfected lips, but remained more  
 328 frequent in SC16-infected lips (8% vs 32% at D10; 5% vs 18% at D28,  $p < 0.03$ , respectively).  
 329 Monocytes were much less frequent between D2 to D4 in SC16-superinfected lips compared  
 330 to SC16-infected lips (2% vs 12% at D2; 1% vs 5% at D4; both  $p < 0.03$ ), but were no longer  
 331 significantly different from D6 to D10. The proportion of NK cells was significantly lower from  
 332 D4 to D10 in SC16-superinfected lips compared to SC16-infected lips (11% vs 18% at D4, 6%  
 333 vs 17% at D6, 4% vs 10% at D10,  $p < 0.03$  for both). In contrast, the proportion of T cells was  
 334 higher in SC16-superinfected lips on D4 and D10 (33% vs 16% at D4; 57% vs 40% at D10;  $p$   
 335  $< 0.03$  for both). Similarly, a higher proportion of B cells and DC was also observed on D4 and  
 336 D10 in SC16-superinfected lips (B cells: 2% vs 0.5% at D4; 3% vs 0.8% at D10 respectively;  
 337 both  $p < 0.03$ ; DC: 11% vs 1% at D4; 15% vs 6% at D10,  $p < 0.03$ ). During latency (D28),  
 338 frequencies of DC were comparable between groups, while T cells were more frequent in  
 339 SC16-superinfected lips compared to lips infected with SC16 (53% vs 39%;  $p < 0.03$ ). These  
 340 results demonstrated that immune infiltrate into SC16-superinfected lips was altered compared  
 341 to the infiltrate of SC16-infected lips, with a higher proportion of adaptive immune cell subsets  
 342 into the superinfected lip.



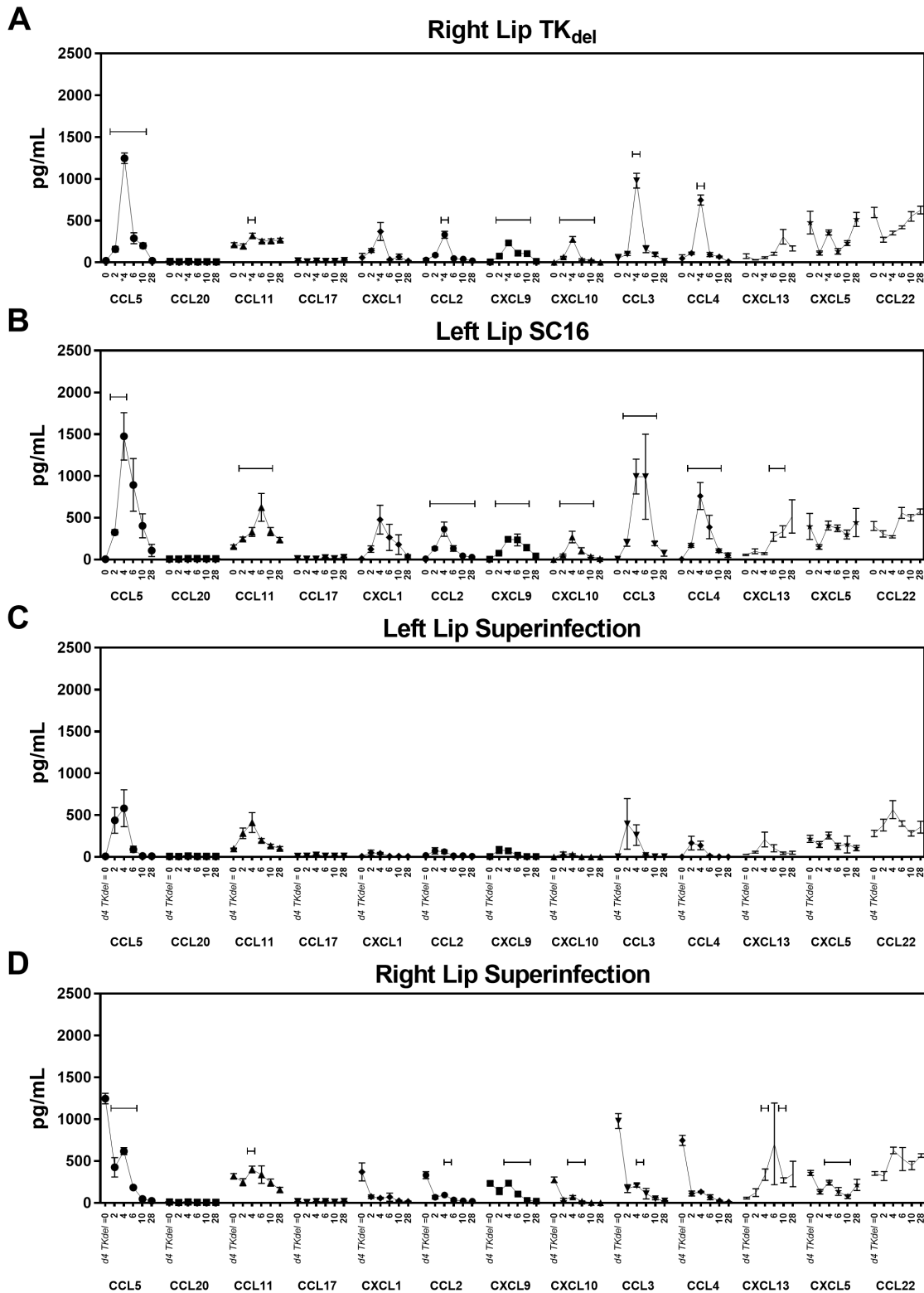
343  
 344 **Figure 5:** Diagram representation of relative frequencies of immune cell subsets as a proportion of  
 345 total CD45<sup>+</sup> in SC16-infected and SC16-superinfected lips over the study period. For the sake of  
 346 clarity, CD4<sup>+</sup> and CD8<sup>+</sup> T cells were merged, so were CD11B<sup>+</sup> and CD11b<sup>-</sup> DC.

347  
 348

### 349 **Reduced levels of inflammatory chemokines in the superinfected lip**

350 To determine the inflammatory response elicited by viral infection of the lip,  
351 inflammatory chemokines were measured after infection by bead-based immunoassay (**Figure**  
352 **6**). The dynamics of inflammatory chemokine concentrations in TK<sub>del</sub>- and SC16-infected lips  
353 were globally similar over time (**Figure 6 A and B**, respectively), with peak chemokine levels  
354 achieved on D4 *post* infection (CCL11 peak occurred on D6) to decline by D6. In TK<sub>del</sub>-infected  
355 lips, only at D4 were concentrations of CCL11, CCL2, CCL3 and CCL4 significantly higher  
356 than uninfected lips at D0 (**Figure 6A**; *bar = p < 0.03 vs D0*). CCL5, CXCL9 and CXCL10  
357 persisted at concentrations higher than those in lips at D0 for the entire acute phase (D2-D10).  
358 However, in SC16-infected lips, chemokine concentrations for CCL2, CCL3, CCL4, CCL11,  
359 CXCL1, CXCL9, and CXCL10 were significantly higher than uninfected lips at D0 from D2 to  
360 D10 (the entire acute phase, **Figure 6B**; *bar = p < 0.03 vs D0*). CCL2 persisted for longer in  
361 SC16-infected lips into latency phase, albeit at low concentrations (D28). The concentration of  
362 CXCL13 in SC16-infected lip continued to rise from D4 to D28, though only the concentrations  
363 at D6 and D10 were significantly higher than that of D0. CCL5 concentrations were elevated  
364 in the SC16-infected lip also, but significant differences to D0 were achieved only on D2 and  
365 D4, as variability amongst replicates after this point may have affected the significance.

366 In SC16-superinfected lips, there were apparent increases in the concentrations of  
367 CCL5, CCL11, CCL3, CCL4, and CXCL13. However, these differences in concentration did  
368 not reach significance when compared to uninfected lips at D0 (**Figure 6 C**). There were  
369 increases of inflammatory chemokine concentrations in the lips contralateral to SC16-  
370 superinfection (i.e. the lip that was infected with TK<sub>del</sub> at D-4; see **Figure 1**) for CCL5, CCL11,  
371 CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3, CXCL13 and CXCL5 (**Figure 6 D**). These chemokines were  
372 detected at sporadic intervals from D2-10 after the SC16 superinfection, which corresponds to  
373 D6-D14 after the TK<sub>del</sub> infection. These results demonstrate the presence of increased and  
374 persisting inflammatory chemokines in SC16-infected lips, in contrast to those infected with  
375 TK<sub>del</sub>. However, in the SC16-superinfected lip there was an obvious reduction/absence of  
376 inflammatory chemokines.



377

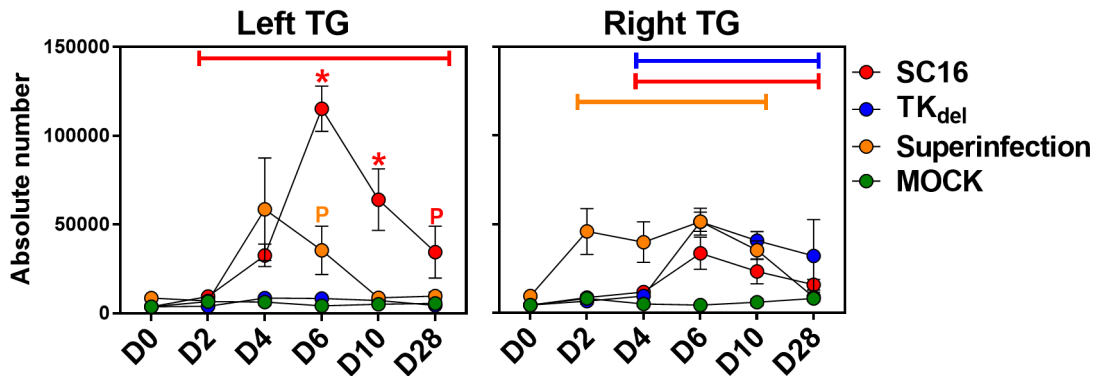
378 **Figure 6:** Inflammatory chemokines concentrations (pg/mL) in the lip tissues over the study period (D0,  
 379 D2, D4, D6, D10, D28). **A)** Inoculated lip (right) of the TK<sub>del</sub> group; **B)** Inoculated lip (left) of the SC16  
 380 group; **C)** SC16 superinfected lip (left) of the superinfection group; **D)** TK<sub>del</sub> inoculated lip (right) of the  
 381 superinfection group. Upper bars indicate significant difference from uninfected D0.

382

383

384 **Attenuated immune cell infiltrate in TG ipsilateral to SC16-superinfection**

385 We previously demonstrated that HSV-1 lytic viral replication predominantly occurs in  
 386 the TG ipsilateral (iTG) to the site of lip infection (Labetoulle et al., 2000c; Poccardi et al.,  
 387 2019). We thus evaluated dynamics of CD45<sup>+</sup> immune cell infiltration into mock-, SC16-, or  
 388 TK<sub>del</sub>-infected iTG, and compared to the number of CD45<sup>+</sup> cells in SC16-superinfected iTG  
 389 (Figure 7).



390  
 391 **Figure 7:** CD45<sup>+</sup> immune infiltrate (absolute number of cells) in the TG over time in the different  
 392 experimental protocols. Upper coloured bars indicate significant difference from control group (list colour  
 393 for group). Upper coloured bars indicate significant difference from uninfected D0. Asterisks indicate for  
 394 Superinfection (orange): a significant difference from the Mock and the SC16 group at the same time,  
 395 or for SC16 (red): a significant difference from the Mock and the Superinfection group at the same time  
 396 point ( $p < 0.03$ ). Coloured P indicates a significant difference between the colour-corresponding group  
 397 and the Mock group.

398  
 399 In mock-infected iTG, there was no significant increase in CD45<sup>+</sup> cells at any time. In  
 400 contrast, there was a subtle yet significant increase in SC16-infected iTG by D2. CD45<sup>+</sup> cell  
 401 numbers had increased 8.7-fold by D4, and again 32-fold, to peak on D6. At D10 CD45<sup>+</sup> cell  
 402 numbers had contracted, but remained much higher than in mock-infected or SC16-  
 403 superinfected iTG (both  $p < 0.03$ ). CD45<sup>+</sup> cell infiltrate dynamics were similar in TK<sub>del</sub>-infected  
 404 iTG. However, the peak numbers occurring on D6 were at lower levels than in the SC16-  
 405 infected iTG. In SC16-infected iTG, CD45<sup>+</sup> cell infiltrate persisted until D28 at levels  
 406 significantly higher than in mock-infected iTG.

407 Some SC16-superinfected iTG harboured apparent increased numbers of CD45<sup>+</sup>  
 408 cells by D4 (Figure 7). However, the average was not statistically significant when compared  
 409 to D0. Even so, significantly more CD45<sup>+</sup> cell numbers were detected by D6 in comparison

410 with mock-infected iTG at this time ( $p < 0.03$ ). CD45<sup>+</sup> cells in SC16-superinfected iTG  
411 contracted to numbers comparable to those of mock-infected iTG by D10, and remained low  
412 until D28. As expected, there were very similar CD45<sup>+</sup> cell infiltration kinetics in the TG  
413 contralateral to SC16 superinfection compared to TK<sub>del</sub>-infected iTG, as D2 after SC16  
414 superinfection corresponds to D6 of the TK<sub>del</sub>-infected group (due to the 4-day delay in lip  
415 inoculations). Combined, these data demonstrated substantial infiltration of the SC16-infected  
416 iTG by D2, which persisted in abundance from D4 and into the latent state of infection. In  
417 contrast, there was a gross reduction in CD45<sup>+</sup> cell infiltrate into SC16-superinfected iTG,  
418 which resolved by D10.

419

#### 420 **Reduced numbers and absence of subset infiltrate in SC16-superinfected iTG**

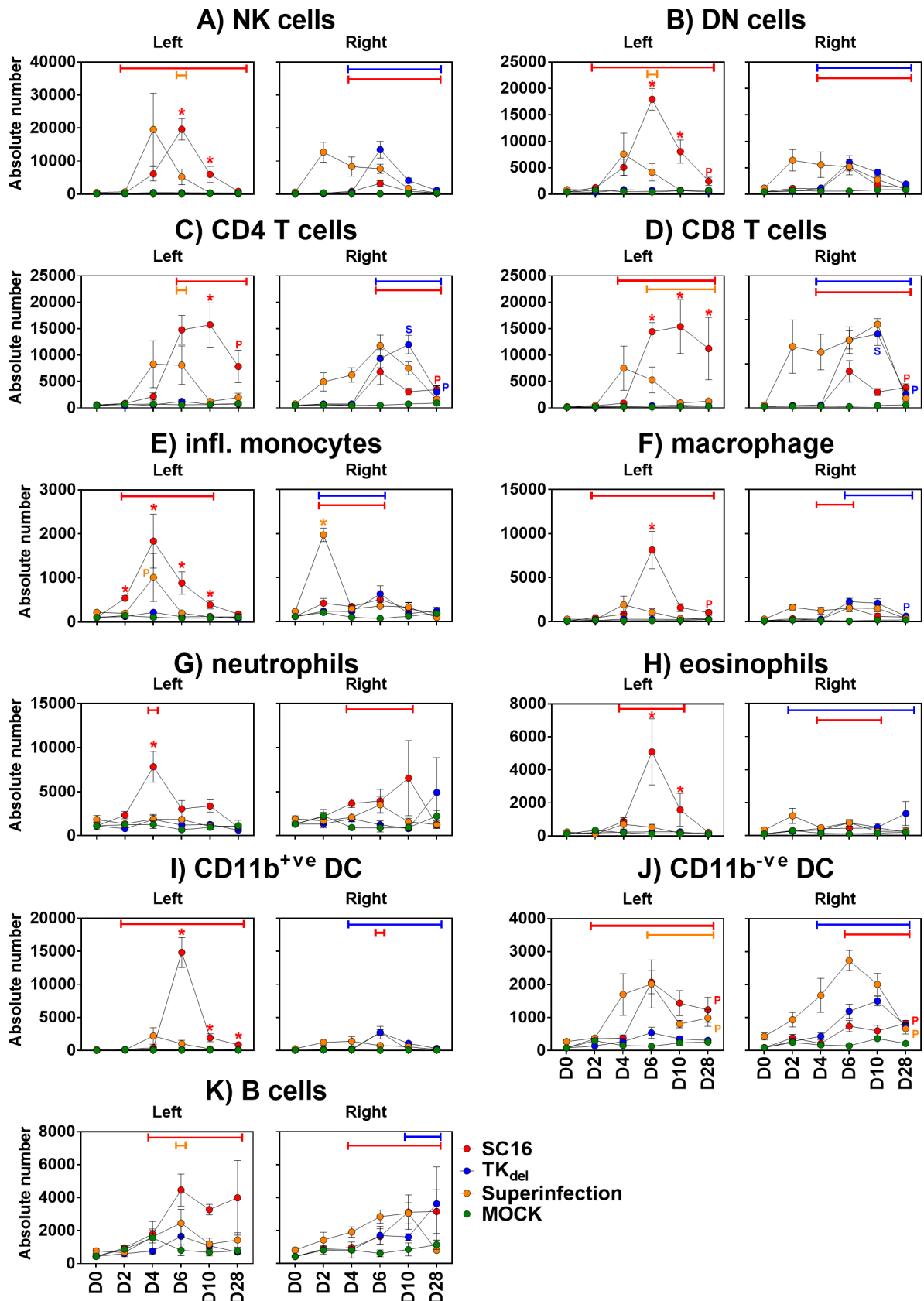
421 To determine how the altered immune responses at the site of lip infection influenced  
422 immune responses in the iTG, we quantified the defined immune subsets in iTG over time  
423 (**Figure 8**). Increases in every immune cell subset were detected in SC16-infected iTG during  
424 the acute phase of infection (D2-D10), to numbers significantly higher than those in TG from  
425 uninfected mice at D0. Numbers spiked on D4 for inflammatory monocytes and neutrophils in  
426 the SC16-infected iTG (**Figure 8 E and G**), but on D6 for all other subsets: NK cells, DN cells,  
427 CD4<sup>+</sup> T cells, CD8<sup>+</sup> T cells, macrophages, eosinophils, CD11b<sup>+</sup> and CD11b<sup>-</sup> DC, and B  
428 cells (**Figure 8 A to D, F, and H to K**). Inflammatory monocytes and eosinophils persisted in  
429 SC16-infected iTG until the end of acute phase at D10 (**Figure 8 E and H**), while neutrophils  
430 declined by D6 (**Figure 8 G**). Remaining cell subsets persisted until the D28 latent phase  
431 (**Figure 8 A to D, F, and I to K**), with CD4<sup>+</sup> and CD8<sup>+</sup> T cells, macrophages, CD11b<sup>+</sup> and  
432 <sup>-</sup>DC remaining significantly higher than those in mock-infected iTG (**Figure 8 C, D, F, I and**  
433 **J**). In the TK<sub>del</sub>-infected iTG, similar infiltrate dynamics occurred in all immune subsets in  
434 comparison with SC16-infected iTG. However, with the exception of CD4<sup>+</sup>, CD8<sup>+</sup> T cells  
435 and CD11b<sup>-</sup> DC, TK<sub>del</sub>-infected iTG infiltrates were much lower (**Figure 8 C, D and J**).  
436 Infiltration dynamics of CD4<sup>+</sup> and CD8<sup>+</sup> T cells and CD11b<sup>-</sup> DC subsets were similar in  
437 magnitude to those of SC16-infected iTG.

438 In the TG contralateral to the SC16-infected lip, we detected increases in inflammatory  
439 monocytes, macrophages, neutrophils, eosinophils, and CD11b<sup>+ve</sup> DC (**Figure 8 E to I**) only  
440 during the acute phase. Whereas, NK cells, DN cells, CD4 and CD8 T cells, CD11b<sup>-ve</sup> DC and  
441 B cells all increased during acute phase and persisted in increased numbers into latency state  
442 (**Figure 8 A to D, J and K**).

443 In SC16-superinfected iTG (**Figure 8; orange left**), there was an overall reduction in  
444 numbers of immune subset infiltration. NK, DN, CD4<sup>+ve</sup> T cells, inflammatory monocytes, and  
445 B cells (**Figure 8 A to C, and K**) increased significantly above controls for a single time point  
446 only (*D4 for inflammatory monocytes, D6 for the remainder*). CD8<sup>+ve</sup> T cell numbers in SC16-  
447 superinfected iTG persisted in increased numbers until D28 (**Figure 8 D**), but at a much lower  
448 level than those in SC16-infected iTG. The increase in CD11b<sup>-ve</sup> DC in the SC16-superinfected  
449 iTG was apparent at D4, but was significantly increased from D6 to D28 (**Figure 8 J**), in similar  
450 numbers to those observed in SC16-infected iTG. Meanwhile, we did not detect increases in  
451 the numbers of macrophages, neutrophils, eosinophils, and CD11b<sup>+ve</sup> DC in SC16-  
452 superinfected iTG (**Figure 7 F to I**).

453 These data demonstrate robust infiltration of SC16-infected iTG by all immune subsets.  
454 Subtle increases in NK cells, DN cells and inflammatory monocytes were present in SC16-  
455 infected iTG as early as D2 *post* infection, while numbers increased drastically by D4 or D6.  
456 However, in the contralateral TG, innate immune population infiltrates were reduced while  
457 adaptive immune populations were similar to the iTG. Similarly, immune infiltration of SC16-  
458 superinfected iTG was altered with substantial lack in numbers of key innate immune  
459 populations, such as macrophages, eosinophils, neutrophils, and CD11b<sup>+ve</sup> DC. However,  
460 adaptive immune responses were also reduced in the SC16-superinfected TG.

461



462

463 **Figure 8 A-K:** Immune subsets infiltrates (absolute number of cells) in the TG over time in the different  
 464 experimental protocols. Upper coloured bars indicate significant difference from uninfected D0. Orange  
 465 asterisk indicates a significant difference for Superinfection group compared to Mock and SC16 groups,  
 466 and red asterisk indicates a significant difference for SC16 compared to Mock and Superinfection groups  
 467 ( $p < 0.03$ ). Coloured *P* indicates a significant difference between the colour-corresponding group and  
 468 the Mock group.

469 **T cells remain the predominant TG infiltrate, while differential kinetics occur during**  
470 **superinfection**

471 To determine how altered immune subset infiltration dynamics changed the global  
472 infiltrate in TGs, we compared the frequencies of immune cell subsets relative to total CD45<sup>+ve</sup>  
473 cells in SC16-infected iTG with SC16-superinfected iTG (**Figure 9**). We noted that T cells were  
474 the predominant subset in both groups. In SC16-infected iTG, the frequency of T cells  
475 increased during the acute phase of infection, from 28% at D4, to 63% at D10 and were similar  
476 at D28 (65%). In contrast, T cell prevalence in SC16-superinfected iTG increased from 34% at  
477 D2, to 55% at D6, then retracted to 36% at D10, and reached 42% at D28. At D10, T cells were  
478 significantly more frequent in SC16-infected iTG than in SC16-superinfected iTG ( $p < 0.03$ ).

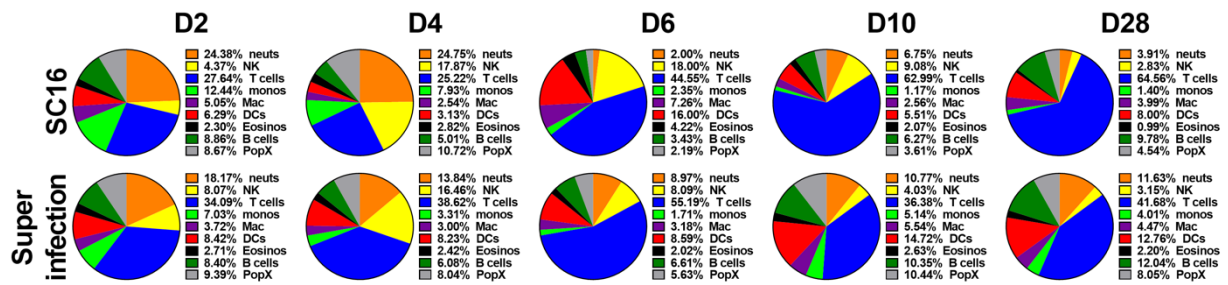
479 Percentages of immune subsets on D2 were similar between SC16-infected and SC16-  
480 superinfected iTG, with the exception of monocytes, which were more common in infiltrate of  
481 SC16-infected iTG than SC16-superinfected iTG (12% vs 7%;  $p < 0.03$ ). Monocytes were also  
482 more abundant in SC16-infected iTG on D4 (8% vs 3%;  $p < 0.03$ ), but by D10 and D28 in  
483 SC16-superinfected iTG (5% vs 1% at D10; 4% vs 1% at D28; both  $p < 0.03$ ).

484 In SC16-infected iTG, the frequency of DC increased from 3% on D4 to 16% on D6,  
485 significantly greater than the 9% in SC16-superinfected iTG ( $p < 0.03$ ), which had remained  
486 consistent from D2 to D6. On D10, DC density had retracted to 6% in SC16-infected iTG, while  
487 in SC16-superinfected iTG increased to 15% ( $p < 0.03$ ).

488 At this same time, the frequencies of NK cells, monocytes macrophages and  
489 eosinophils declined at the expense of increasing T cell and neutrophil frequencies in SC16-  
490 infected iTG. However, the converse occurred in SC16-superinfected iTG, where T cells and  
491 NK cell abundance declined at the expense of increases in all other subsets. These results  
492 illustrate differential kinetics in monocyte, DC and T cell proportions during early and late acute  
493 phase infection. T cells remained the major infiltrating population of both SC16-infected and  
494 SC16-superinfected iTG, where they increased in prevalence SC16-infected iTG, while  
495 contracting over the same period in SC16-superinfected iTG. Monocytes were more frequent  
496 in SC16-infected iTG during early acute phase, and in SC16-superinfected iTG during late  
497 acute phase and latency. Meanwhile, DC spiked dramatically on D6 in SC16-infected iTG and



498 retracted quickly, but in SC16-superinfected iTG increased during late acute phase and  
 499 remained consistent into latency.



500

501 **Figure 9:** relative frequencies of immune cell subsets as a proportion of total CD45<sup>+</sup>ve in TG ipsilateral  
 502 to SC16 infection and SC16 superinfection over the study period. For the sake of clarity, CD4<sup>+</sup>ve and  
 503 CD8<sup>+</sup>ve T cells were merged, so were CD11B<sup>+</sup>ve and CD11b<sup>-</sup>ve DC.

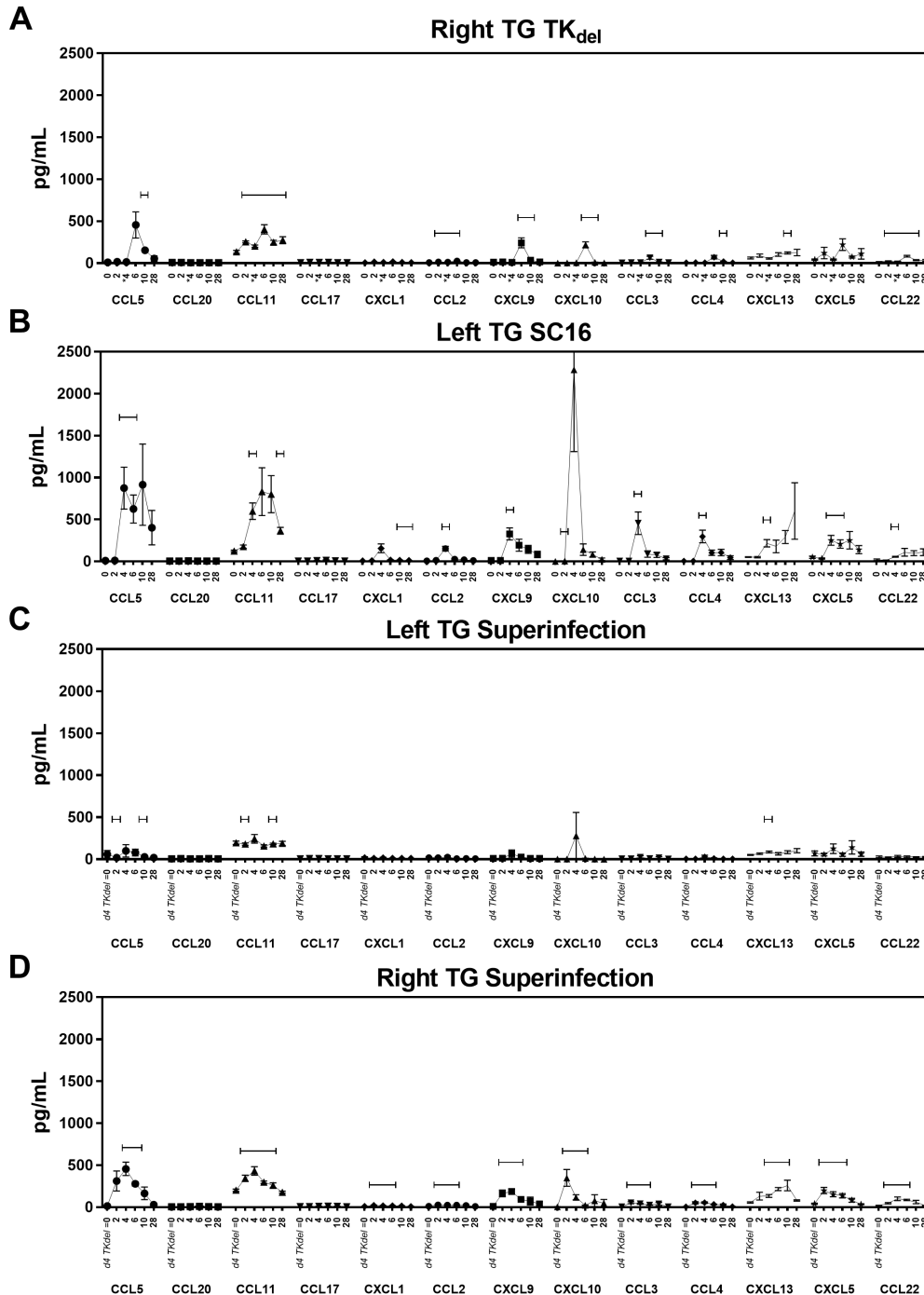
504

505 **Inflammatory chemokines of SC16-infected iTG are diminished in the SC16-**  
 506 **superinfected iTG**

507 To determine the inflammatory response elicited by HSV-1 infection of the TG,  
 508 inflammatory chemokines were measured in TK<sub>del</sub>- or SC16-infected iTG by bead-based  
 509 immunoassay (**Figure 10**). To confirm that changes occurred in SC16-superinfected iTG, we  
 510 compared concentrations of inflammatory chemokines to those measured in SC16-infected  
 511 iTG.

512 We detected increased concentrations of chemokines CCL5, CCL11, CCL2, CXCL9,  
 513 CXCL10, CCL3, CCL4, CXCL13, and CCL22, which peaked at D6 in TK<sub>del</sub>-infected iTG  
 514 (**Figure 10 A**). These chemokines, plus CXCL1 and CXCL5, were also detected in SC16-  
 515 infected iTG (**Figure 10 B**), but at greater concentrations. Interestingly, concentrations of  
 516 CXCL1, CCL2, CCL3, CCL4, CXCL9 and CXCL10 peaked on D4 in SC16-infected iTG, 2 days  
 517 earlier than in TK<sub>del</sub>-infected iTG. In contrast to SC16- or TK<sub>del</sub>-infected iTG, only CCL5, CCL11  
 518 and CXCL13 were detected in SC16-superinfected iTG (**Figure 10 C**). In TGs contralateral to  
 519 SC16-superinfection in the lip, (i.e. in the TG ipsilateral to right lip infection with TK<sub>del</sub> (**Figure**  
 520 **1**), significant concentrations were detected for CCL5, CCL11, CCL2, CXCL9, CXCL10, CCL3,  
 521 CXCL13 and CXCL5 (**Figure 10 D**). These chemokines were detected from D2, which  
 522 corresponds to D6 after the TK<sub>del</sub> infection in the ipsilateral lip, following a similar trend to  
 523 chemokine dynamics of the TK<sub>del</sub>-infected iTG. These data define inflammatory responses in  
 524 the TG ipsilateral to HSV-1 infection in the lip. There was a delay in the spike of inflammatory

525 chemokines in TK<sub>del</sub>-infected iTG, and overall concentrations were higher in SC16-infected iTG.  
 526 On the other hand, SC16-superinfected iTG were absent of most inflammatory chemokines,  
 527 or they were greatly reduced in comparison to inflammatory chemokines of SC16-infected iTG.



528  
 529 **Figure 10:** Inflammatory chemokines concentrations (pg/mL) in the TG tissues over the study period  
 530 (D0, D2, D4, D6, D10, D28). **A)** TG ipsilateral to TK<sub>del</sub> inoculation (right) of the TK<sub>del</sub> group; **B)**  
 531 TG ipsilateral to SC16 inoculation (left) of the SC16 group; **C)** TG ipsilateral to the SC16 superinfection  
 532 (left) of the superinfection group; **D)** TG ipsilateral to the TK<sub>del</sub> inoculation lip (right) of the  
 533 superinfection group. Upper bars indicate significant difference from uninfected D0.

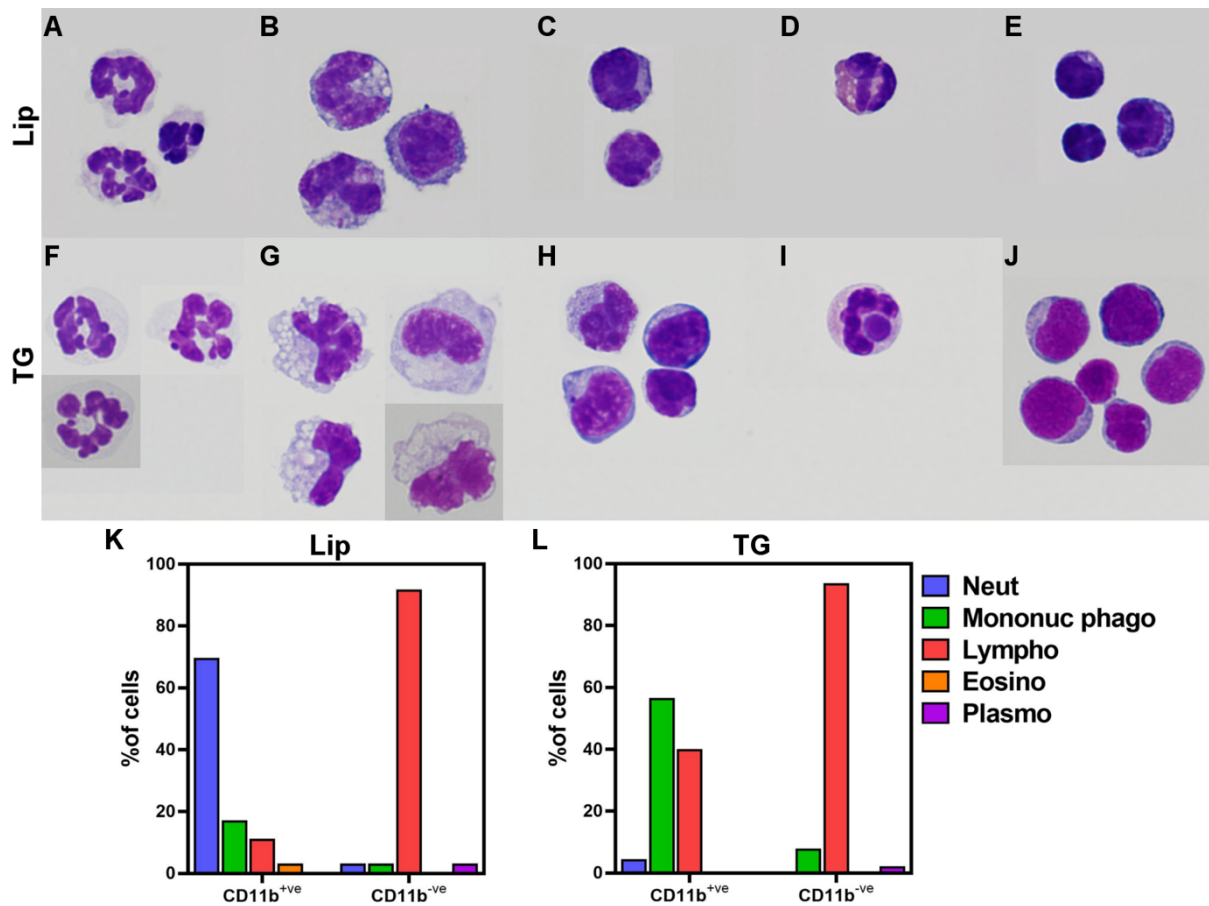
534  
 535

536 **Cytological comparison of lip and TG immune infiltrates**

537 To further characterise cells present in lip and TG samples, we sorted live CD45<sup>+</sup>ve  
538 single cells that were CD11b<sup>+</sup>ve or CD11b<sup>-</sup>ve by flow cytometry, then cytopsin and Giemsa  
539 staining were performed before analysis by microscopy (**Figure 11**). Cells harvested from the  
540 lip or TG at D6 were characterised based on morphology as neutrophils, mononuclear  
541 phagocytes, lymphocytes, eosinophils or plasmocytes. Neutrophils appeared to be of “late-  
542 phase” lifecycle, indicated by their polynucleated appearance in both lip and TG (**Figure 11A**  
543 **and F**). Vacuolar structures of mononuclear phagocytes (**Figure B and G**), and concentrated  
544 blue staining at the membrane of lymphocytes (**Figure C, E, H and J**) indicated activated  
545 states.

546 There was an obvious difference in the composition of the CD11b<sup>+</sup>ve compartment when  
547 comparing cells from the lip and from the TG. CD11b<sup>+</sup>ve cells from lip were primarily composed  
548 of 69% neutrophils and 17% mononuclear phagocytes, plus 11% lymphocytes and 3%  
549 eosinophils (**Figure 11 K**). In contrast, CD11b<sup>+</sup>ve populations in the TG were either  
550 mononuclear phagocytes (56%) or lymphocytes (40%) on D6 (**Figure 11 L**). Lymphocytic cells  
551 made up the vast majority of the CD11b<sup>-</sup>ve compartment in the lip (91%) and in the TG (93%).  
552 These data confirmed drastic differences in the immune infiltrate within lip and TG tissues at  
553 D6 after lip infection with HSV-1, with neutrophils being predominant in the lips, and  
554 lymphocytes in the TG.

555



556

557 **Figure 11: upper part** : illustrative examples of CD11b<sup>+ve</sup> and CD11b<sup>-ve</sup> immune subsets observed in  
 558 lip and TG tissues cells suspensions at D6 after SC16 inoculation. **A)** Lip CD11b<sup>+ve</sup> neutrophils, **B)** Lip  
 559 CD11b<sup>+ve</sup> monocytes / phagocytes, **C)** Lip CD11b<sup>+ve</sup> lymphocytes, **D)** Lip CD11b<sup>+ve</sup> eosinophils, **E)** Lip  
 560 CD11b<sup>-ve</sup> lymphocytes, **F)** TG CD11b<sup>+ve</sup> neutrophils, **G)** TG CD11b<sup>+ve</sup> monocytes / phagocytes, **H)** TG  
 561 CD11b<sup>+ve</sup> lymphocytes, **I)** TG CD11b<sup>+ve</sup> eosinophils, **J)** TG CD11b<sup>-ve</sup> lymphocytes. Neutrophils appeared  
 562 to be of “late-phase” lifecycle, indicated by their polynucleated appearance in both lip and TG (**A, F**).  
 563 Vacuolar structures of mononuclear phagocytes (**B, G**), and concentrated blue staining at the membrane  
 564 of lymphocytes (**C, E, H and J**) indicated activated states.

565 **Lower part** : Relative proportions of neutrophils, Mononuclear phagocytes, lymphocytes, eosinophils  
 566 and plasmacytes in lip (**K**) and TG (**L**) samples.

567

568

## 569 DISCUSSION

570 Our previous study identified that lytic viral replication, ocular disease, and viral  
 571 reactivations occur restricted to the side of lip inoculation with a virulent strain of HSV-1 (SC16)  
 572 (Poccardi et al., 2019). When inoculation was performed using a non-neurovirulent strain  
 573 (TK<sub>del</sub>), this protective state developed to include both sides. Indeed, upon virulent viral  
 574 superinfection challenge in the contralateral lip 4 days (or more) later, superinfecting virus  
 575 replication was attenuated to almost undetectable levels in the iTG, while disease and  
 576 reactivations from latency were absent. Interestingly, this 4-day interval corresponds with a  
 577 time in our present study, when maximal immune cell infiltrate was occurring at the site of initial

578 lip infection with SC16 or TK<sub>del</sub> (**Figure 3**). When TK<sub>del</sub> was inoculated into the right lip of mice,  
579 and 4 days later superinfected with SC16 in the left lip, we even witnessed a more rapid  
580 recruitment of CD45<sup>+</sup> cells into the superinfected lip 2 days earlier, on D2. This infiltrate was  
581 similar in magnitude to that of the SC16-infected lip at its D4 peak, and was a major discernable  
582 immune feature at the site of lip superinfection. Canivet *et al.*, have demonstrated that the early  
583 recruitment of immune cells into HSV-1-infected central nervous system (CNS) tissues plays  
584 an important role in the reduced clinically susceptibility of C57BL/6 mice to HSV-1-mediated  
585 encephalitis (Canivet *et al.*, 2019). The rapid immune response of this mice strain, after  
586 intranasal infection with virus, lead to greater control of viral replication and protection against  
587 disease. In contrast, BALB/c mice were more susceptible due to a delayed infiltration of the  
588 CNS by immune cell subsets (Canivet *et al.*, 2019). These results explain how, in our  
589 experiments, the more rapid recruitment of immune cells into superinfected lip, elicited by the  
590 antecedent inoculation with TK<sub>del</sub>, may provide more efficient control of HSV-1 replication, and  
591 reduce the viral burden reaching the TG in our model.

592         The roles and sources of inflammatory chemokines in HSV-1 disease have been  
593 studied in various experimental models. HSV-1 is first detected by the immune system via PRR  
594 sensing within hours of infection (Melchjorsen, 2012). The detection of HSV-1-derived PAMP  
595 drives local proinflammatory process, where secretion of inflammatory chemokines occurs to  
596 recruit different immune cell subsets into the site of inflammation (Melchjorsen, 2012; Gianni  
597 *et al.*, 2013; Sokol and Luster, 2015). However, some chemokines are reliant on the presence  
598 of specific cell subsets for expression, due to different PRR expression profiles. Thus, different  
599 signalling profiles, which will trigger altered immune dynamics, can be achieved by the  
600 presence of virus and viral PAMP in the absence of lytic infection (Megjugorac *et al.*, 2004;  
601 Soby *et al.*, 2012; Molesworth-Kenyon *et al.*, 2015). Furthermore, the production of type I and  
602 III interferons, TNF- $\alpha$ , IL-6 and CXCL10 are a direct consequence of HSV-1 sensing  
603 (Melchjorsen, 2012), while type II interferon and IL-10 can feedback and limit expression of  
604 chemokines, to shape the type of immune response in infected areas (Tumpey *et al.*, 1998;  
605 Molesworth-Kenyon *et al.*, 2015). Noteworthy, we use an ultra-fine glass needle (hand-made  
606 by elongation) for the inoculation in the lip, whit no previous scarification or incision (Labetoulle

607 et al., 2000a), which likely reduces the level of inflammation at the site of virus inoculation in  
608 comparison to other models. But even minimal, this insult to the skin barrier likely induces a  
609 post-traumatic inflammatory reaction (Brazil et al., 2019). Indeed, we detected a subtle  
610 increase in innate immune subsets at the site of mock infection (PBS injection) on D2, which  
611 resolved by D4 (**Figure 4 E to J**). While the D2 increases also occurred in SC16- or TK<sub>del</sub>-  
612 infected lips, infiltration was exacerbated on D4 (**Figure 4 E to J**). Comparatively, no  
613 monocytes and CCL2 was observed at D4 in SC16-superinfected lips, (**Figure 6C**), suggesting  
614 that the key signaling processes that recruit monocytes to site of HSV-1 lip infection, such as  
615 lytic viral replication early after viral inoculation, is severely reduced by the previous infection  
616 with the TKdel strain in the contralateral lip.

617 While similar levels of inflammatory chemokines (CCL5, CCL11, CXCL1, CCL2,  
618 CXCL9, CXCL10, CCL3, CCL4) were observed in the lips just after the inoculation of SC16-  
619 or TK<sub>del</sub>-strains (**Figure 6 A and B, respectively**), much lower levels were detected in the iTG  
620 of the TK<sub>del</sub> versus SC16 group (**Figure 10 A and B, respectively**). This difference is likely  
621 directly related to the non-neurovirulent nature of TK<sub>del</sub>: the lack of viral replication within the  
622 neuronal somata (Efstathiou et al., 1989), located in the TG, likely reduced cellular exposure  
623 to HSV-1 PAMP (Marques et al., 2006). It is interesting to note that peak chemokine levels  
624 occurred delayed at D6 in TK<sub>del</sub>-infected iTG compared to D4 in SC16-infected iTG (**Figure 10**  
625 **A vs B**), this phenomenon corresponded with trending peaks of inflammatory monocyte  
626 infiltrate in the respective iTGs at these times (**Figure 8 E**). These data suggest that, compared  
627 to single SC16 inoculation, viral sensing in the TG ipsilateral to TK<sub>del</sub> inoculation is delayed,  
628 and that inflammatory chemokines in the TG are produced by, or directly involved in the  
629 recruitment of, inflammatory monocytes. In mice of the superinfection group, the SC16-  
630 superinfected iTG was characterized by reduced and delayed inflammatory monocyte burden  
631 (**Figure 8 E**), accompanied by an absence in other inflammatory immune subsets, such as  
632 macrophages, neutrophils, eosinophils (**Figure 8 E to I**). These data corroborate our previous  
633 findings on the blockade of viral replication control in SC16-superinfected iTG (Poccardi et al.,  
634 2019). In contrast, the important and persistent expression of inflammatory chemokines in

635 single SC16-infected iTG adds clues that lytic viral replication exacerbates the recruitment of  
636 additional inflammatory cells.

637 Many innate immune subsets work in concert for the control of HSV-1 (Lucinda et al.,  
638 2017). Monocytes perform inflammatory functions, and also differentiate into DC and  
639 macrophage subsets (Conrady et al., 2013; Katsumoto et al., 2014; Vogel et al., 2014;  
640 Menasria et al., 2015). NK cells recognise and lyse HSV-1-infected cells (Dai and Caligiuri,  
641 2018), while CD11b<sup>+</sup> cells have been found to enhance the histological lesions in the cornea,  
642 and concomitantly reduce the viral replication in the TG (Chucair-Elliott et al., 2017). However,  
643 it is difficult to ascertain the real functions of immune subsets during the natural course of HSV-  
644 1 infection when their roles are assessed in animal models (e.g. corneal scarification) that do  
645 not correspond with the vast majority (>96%) of primary HSV-1 infections at the orofacial  
646 mucocutaneous tissues as observed in humans (Liesegang, 1989). Indeed, the ocular  
647 scarification route modifies experimental HSV-1 disease outcomes (Cavallero et al., 2014) and  
648 first exposes the virus to an immune privileged tissue (Knickelbein et al., 2007; Taylor and Ng,  
649 2018; Lee et al., 2019) instead of the skin, which is a professional antiviral immune organ  
650 (Levin et al., 2015; Handfield et al., 2018). We detected neutrophils as the major population  
651 infiltrating lip tissue (**Figure 5**), and the TG soon after inoculation (**Figure 9**). In other  
652 mucocutaneous infection models, these cells were not involved in the control of the disease  
653 (Wojtasiak et al., 2010), nor in the antigen transport to the lymph nodes (Hor et al., 2017). In  
654 the ocular scarification models, neutrophils have been considered as providing inflammatory  
655 signaling (Molesworth-Kenyon et al., 2012), and promoting exacerbation of disease (Shen et  
656 al., 2013). In our experiments, neutrophil infiltrate peaked at D4 in the lip and TG, and  
657 maintained a dominance during early acute phase disease (**Figure 4, 5, 8 and 9**), while their  
658 “aged” appearance at D6 (**Figure 10 A and F**) suggests they likely remain in SC16-infected  
659 tissues until they die. Their late persistence into SC16-infected lips compared to their rapid  
660 clearance in the SC16-superinfected suggest that these cells are not associated with  
661 protection in our model.

662 Noteworthy, we observed an increased presence of eosinophils in HSV-1-infected lips  
663 (**Figure 4H**), and in the TGs ipsilateral to single SC16 inoculation (**Figure 8H**), concomitant

664 with elevated levels of CCL11 in lip and TG samples (**Figures 6 and 10**). To the best of our  
665 knowledge, the role of eosinophils in the context of HSV-1 infection has not yet been described  
666 while they are well known as major effectors in the context of allergic diseases. Clinical reports  
667 had already emphasized that allergic people may experience i) more severe course of HSK  
668 than non-allergic controls (Rezende et al., 2006; Borkar et al., 2014), and ii) severe  
669 superinfections of atopic dermatitis lesions (Ong and Leung, 2016). However, the mechanistic  
670 relationship of these association remains undeciphered (Doutlik et al., 1989). Eosinophils are  
671 also known to be involved in the anti-helminth immune reaction where they play equivocal roles  
672 (Fabre et al., 2009; Huang and Appleton, 2016), and in the pathophysiology of respiratory virus  
673 infections where they participate in innate and adaptive responses (Flores-Torres et al., 2019).  
674 Altogether eosinophils seem to be important components of anti-infectious immunity, with  
675 equivocal functions, maybe due to their multifunctionality during different inflammatory  
676 conditions (Weller and Spencer, 2017). One interesting function of eosinophils is the ability to  
677 increase neuronal axon branching without direct contact with the neuron itself (Foster et al.,  
678 2011). Thus, in the context of our experiments, eosinophils could facilitate viral cell-to-cell  
679 transmission (Carmichael et al., 2018) within the infected lip or TG under inflammatory  
680 conditions.

681 Dendritic cells are known to play a central role in the immune response to skin infections  
682 (Eyerich et al., 2018). Transmission of HSV-1 antigen from skin to the lymph node occurs via  
683 a relay between Langerhans cells and dermal DCs, to conventional DC1 (cDC1) (Kim et al.,  
684 2015) that prime T cell responses (Whitney et al., 2018). Globally, numbers of CD11b<sup>+ve</sup> DC in  
685 SC16-infected lip infection did not increase until late acute phase and into latency (**Figure 4**).  
686 However, CD11b<sup>+ve</sup> DC numbers were increased by D2 in SC16-superinfected lips (**Figure 4**  
687 **I**), and may include DCs that prime tissue-homing T cell responses (Hain et al., 2019). This  
688 suggests that a heightened level of immunosurveillance is established by D4 in mice initially  
689 infected with TK<sub>del</sub>, which allows greater exposure of virus to professional antigen-presenting  
690 cells that prime HSV-1-specific adaptive T cell responses. Furthermore, both DC subsets were  
691 present during virus latency (D28) in the TGs and lips (**Figures 4 I and J, and 8 I and J**),  
692 suggesting heightened levels of immunosurveillance even after lytic viral replication has



693 stopped. We acknowledge we were unable to discriminate CD11b<sup>+</sup> DC subsets using our  
694 staining panel, which may include monocyte-derived DC, cDC2, macrophages or satellite glial  
695 cells (Xu et al., 2005; van Velzen et al., 2009; Conrady et al., 2013; Segura and Amigorena,  
696 2013; Hain et al., 2019). Thus, complementary experiments will necessary to further define the  
697 subpopulations of CD11b<sup>+</sup> DC and their specific roles in our model, a question that was  
698 beyond the scopus of this wide range exploratory study about immune kinetics following  
699 different regimen of HSV-1 inoculation.

700 T cells are major component of HSV-1 immunity. We demonstrated a ~10 to 8-fold  
701 increases in the number of CD4<sup>+</sup> and CD8<sup>+</sup> T cells infiltrating into SC16- or TK<sub>del</sub>-infected  
702 lips at D4 after lip infection (**Figure 4 C and D**). Interestingly, Coles *et al.*, using a cutaneous  
703 murine model of HSV-1 disease, where effector T cells, primed by DCs in the lymph node,  
704 were migrating throughout the body from D4 post infection (Coles et al., 2002). The same  
705 group later demonstrated that these “armed” effector T cells were able to eliminate HSV-1-  
706 infected cells during the lytic replication but did not prevent viral dissemination to the sensitive  
707 neuronal ganglia (van Lint et al., 2004). Noteworthy, this time point also corresponds to the  
708 minimal interval needed by TK<sub>del</sub> to confer protection against SC16 superinfection (Poccardi  
709 et al., 2019). Due to the HSV-1 infection kinetics after single lip infection, viral replication can  
710 not be prevented in the SC16-infected iTG, as long as it is already ongoing at D4 (Labetoulle  
711 et al., 2003). However, as lytic viral replication starts from D6 in the contralateral TG, we  
712 believe that triggering the mobilisation of HSV-1-specific effector T cells by lip infection could  
713 be a major factor that protects the contralateral TG from HSV-1 thus restricting disease to  
714 unilaterality. Under superinfection conditions, the antecedent TK<sub>del</sub> inoculation of the lip may  
715 elicit effector T cell immunosurveillance (Gebhardt et al., 2013) to place T cells as early  
716 responders in the SC16-superinfected lip (**Figure 4 C and D**).

717 TK<sub>del</sub> is unable to replicate in neurons due to the lack of viral thymidine kinase  
718 (Efsthathiou et al., 1989). However, this strain is able to penetrate the nerve endings at the site  
719 of inoculation after local replication in the epithelia (where cellular thymidine kinase is  
720 expressed, contrary to neurons), with subsequent persistent infection in TG neurons  
721 (Efsthathiou et al., 1989; Rosato and Leib, 2015), but with no possibility of reactivation (Coen et

722 al., 1989; Poccardi et al., 2019). We observed an obvious reduction of the inflammatory  
723 immune response in the TK<sub>del</sub>-infected iTG compared to SC16-infected iTG (**Figure 8 E to I**),  
724 while similar levels of lip infiltration occurred (**Figure 4 E to I**). Thus, this modified strain of HSV-  
725 1 appears as ideal for triggering protective immune mechanisms, while constraining lytic viral  
726 replication to the site of infection, i.e. in the lip.

727 It is also possible that the TK<sub>del</sub> strain may be non-virulent in some immune cells that  
728 do not express cellular thymidine kinase, such as mature neutrophils, but remain susceptible  
729 to wild-type HSV-1 infection (Gill et al., 2009). If so, TK<sub>del</sub> initial infection alone could modulate  
730 immune responses to HSV-1, through the potential antigen presenting abilities of these cell  
731 subsets (Takashima and Yao, 2015).

732 Our study provides important insights into the relationship between immune response  
733 kinetics and HSV-1 infection kinetics, according to the fitness of the viral strain and the  
734 sequence of inoculation (single versus reinfection). Based on the OO model, that mimics most  
735 of the key clinical aspects of human HSV-1-associated disease, our data help in the  
736 comprehension of the unilateral nature of the HSK in humans, and also provide arguments for  
737 the feasibility of a preventive strategy against HSV-1 ocular disease based on the use of  
738 modified HSV-1 strains as vaccinal tools. Indeed, we demonstrated changes in the local  
739 immune landscape i.e. early recruitment of lymphocytes into the primary infection site, and an  
740 absence/reduction of inflammatory cells and chemokines during acute phase of virus  
741 replication, which were associated with development or protection against disease, including  
742 reactivations from latency. The state of immunity that occurs naturally after viral inoculation  
743 into the lip could thus be exploited as the basis for a vaccine design rationale. This final  
744 objective will however require further studies to complete the characterisation of all  
745 mechanisms involved in that protection.

746

747

748

749

750

## 751 REFERENCES

- 752 Borkar, D.S., Gonzales, J.A., Tham, V.M., Esterberg, E., Vinoya, A.C., Parker, J.V., et al.  
753 (2014). Association between atopy and herpetic eye disease: results from the pacific  
754 ocular inflammation study. *JAMA Ophthalmol* 132(3), 326-331. doi:  
755 10.1001/jamaophthalmol.2013.6277.
- 756 Brazil, J.C., Quiros, M., Nusrat, A., and Parkos, C.A. (2019). Innate immune cell-epithelial  
757 crosstalk during wound repair. *J Clin Invest* 130. doi: 10.1172/jci124618.
- 758 Canivet, C., Uyar, O., Rheume, C., Piret, J., and Boivin, G. (2019). The recruitment of  
759 peripheral blood leukocytes to the brain is delayed in susceptible BALB/c compared  
760 to resistant C57BL/6 mice during herpes simplex virus encephalitis. *J Neurovirol*  
761 25(3), 372-383. doi: 10.1007/s13365-019-00730-5.
- 762 Carmichael, J.C., Yokota, H., Craven, R.C., Schmitt, A., and Wills, J.W. (2018). The HSV-1  
763 mechanisms of cell-to-cell spread and fusion are critically dependent on host PTP1B.  
764 *PLoS Pathog* 14(5), e1007054. doi: 10.1371/journal.ppat.1007054.
- 765 Catez, F., Picard, C., Held, K., Gross, S., Rousseau, A., Theil, D., et al. (2012). HSV-1  
766 genome subnuclear positioning and associations with host-cell PML-NBs and  
767 centromeres regulate LAT locus transcription during latency in neurons. *PLoS Pathog*  
768 8(8), e1002852. doi: 10.1371/journal.ppat.1002852.
- 769 Cavallero, S., Huot, N., Francelle, L., Lomonte, P., Naas, T., and Labetoulle, M. (2014).  
770 Biological features of herpes simplex virus type 1 latency in mice according to  
771 experimental conditions and type of neurones. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 55(12),  
772 7761-7774. doi: 10.1167/iovs.14-14673.
- 773 Chucair-Elliott, A.J., Gurung, H.R., Carr, M.M., and Carr, D.J.J. (2017). Colony Stimulating  
774 Factor-1 Receptor Expressing Cells Infiltrating the Cornea Control Corneal Nerve  
775 Degeneration in Response to HSV-1 Infection. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 58(11),  
776 4670-4682. doi: 10.1167/iovs.17-22159.
- 777 Coen, D.M., Kosz-Vnenchak, M., Jacobson, J.G., Leib, D.A., Bogard, C.L., Schaffer, P.A., et  
778 al. (1989). Thymidine kinase-negative herpes simplex virus mutants establish latency  
779 in mouse trigeminal ganglia but do not reactivate. *Proc Natl Acad Sci U S A* 86(12),  
780 4736-4740.
- 781 Cohrs, R.J., Randall, J., Smith, J., Gilden, D.H., Dabrowski, C., van Der Keyl, H., et al.  
782 (2000). Analysis of individual human trigeminal ganglia for latent herpes simplex virus  
783 type 1 and varicella-zoster virus nucleic acids using real-time PCR. *J Virol* 74(24),  
784 11464-11471. doi: 10.1128/jvi.74.24.11464-11471.2000.
- 785 Coles, R.M., Mueller, S.N., Heath, W.R., Carbone, F.R., and Brooks, A.G. (2002).  
786 Progression of armed CTL from draining lymph node to spleen shortly after localized  
787 infection with herpes simplex virus 1. *J Immunol* 168(2), 834-838. doi:  
788 10.4049/jimmunol.168.2.834.
- 789 Conrady, C.D., Zheng, M., Mandal, N.A., van Rooijen, N., and Carr, D.J. (2013). IFN-alpha-  
790 driven CCL2 production recruits inflammatory monocytes to infection site in mice.  
791 *Mucosal Immunol* 6(1), 45-55. doi: 10.1038/mi.2012.46.
- 792 Dai, H.S., and Caligiuri, M.A. (2018). Molecular Basis for the Recognition of Herpes Simplex  
793 Virus Type 1 Infection by Human Natural Killer Cells. *Front Immunol* 9, 183. doi:  
794 10.3389/fimmu.2018.00183.
- 795 Decman, V., Freeman, M.L., Kinchington, P.R., and Hendricks, R.L. (2005). Immune control  
796 of HSV-1 latency. *Viral Immunol* 18(3), 466-473. doi: 10.1089/vim.2005.18.466.
- 797 Doutlik, S., Kutinova, L., Benda, R., Kaminkova, J., Krcmar, M., Votruba, T., et al. (1989).  
798 Some immunological characteristics of subjects suffering from frequent herpes  
799 simplex virus recrudescences. *Acta Virol* 33(5), 435-446.
- 800 Efstathiou, S., Kemp, S., Darby, G., and Minson, A.C. (1989). The role of herpes simplex  
801 virus type 1 thymidine kinase in pathogenesis. *J Gen Virol* 70 ( Pt 4), 869-879. doi:  
802 10.1099/0022-1317-70-4-869.
- 803 Eyerich, S., Eyerich, K., Traidl-Hoffmann, C., and Biedermann, T. (2018). Cutaneous Barriers  
804 and Skin Immunity: Differentiating A Connected Network. *Trends Immunol* 39(4), 315-  
805 327. doi: 10.1016/j.it.2018.02.004.

806 Fabre, V., Beiting, D.P., Bliss, S.K., Gebreselassie, N.G., Gagliardo, L.F., Lee, N.A., et al.  
807 (2009). Eosinophil deficiency compromises parasite survival in chronic nematode  
808 infection. *J Immunol* 182(3), 1577-1583. doi: 10.4049/jimmunol.182.3.1577.

809 Flores-Torres, A.S., Salinas-Carmona, M.C., Salinas, E., and Rosas-Taraco, A.G. (2019).  
810 Eosinophils and Respiratory Viruses. *Viral Immunol* 32(5), 198-207. doi:  
811 10.1089/vim.2018.0150.

812 Foster, E.L., Simpson, E.L., Fredrikson, L.J., Lee, J.J., Lee, N.A., Fryer, A.D., et al. (2011).  
813 Eosinophils increase neuron branching in human and murine skin and in vitro. *PLoS*  
814 *One* 6(7), e22029. doi: 10.1371/journal.pone.0022029.

815 Gebhardt, T., Mueller, S.N., Heath, W.R., and Carbone, F.R. (2013). Peripheral tissue  
816 surveillance and residency by memory T cells. *Trends Immunol* 34(1), 27-32. doi:  
817 10.1016/j.it.2012.08.008.

818 Gelderblom, M., Leyboldt, F., Steinbach, K., Behrens, D., Choe, C.U., Siler, D.A., et al.  
819 (2009). Temporal and spatial dynamics of cerebral immune cell accumulation in  
820 stroke. *Stroke* 40(5), 1849-1857. doi: 10.1161/strokeaha.108.534503.

821 Gianni, T., Leoni, V., and Campadelli-Fiume, G. (2013). Type I interferon and NF-kappaB  
822 activation elicited by herpes simplex virus gH/gL via alphavbeta3 integrin in epithelial  
823 and neuronal cell lines. *J Virol* 87(24), 13911-13916. doi: 10.1128/jvi.01894-13.

824 Gill, M.B., Wright, D.E., Smith, C.M., May, J.S., and Stevenson, P.G. (2009). Murid  
825 herpesvirus-4 lacking thymidine kinase reveals route-dependent requirements for  
826 host colonization. *J Gen Virol* 90(Pt 6), 1461-1470. doi: 10.1099/vir.0.010603-0.

827 Hain, T., Melchior, F., Kamenjarin, N., Muth, S., Weslati, H., Clausen, B.E., et al. (2019).  
828 Dermal CD207-Negative Migratory Dendritic Cells Are Fully Competent to Prime  
829 Protective, Skin Homing Cytotoxic T-Lymphocyte Responses. *J Invest Dermatol*  
830 139(2), 422-429. doi: 10.1016/j.jid.2018.08.022.

831 Handfield, C., Kwock, J., and MacLeod, A.S. (2018). Innate Antiviral Immunity in the Skin.  
832 *Trends Immunol* 39(4), 328-340. doi: 10.1016/j.it.2018.02.003.

833 Hill, T.J., Field, H.J., and Blyth, W.A. (1975). Acute and recurrent infection with herpes  
834 simplex virus in the mouse: a model for studying latency and recurrent disease.  
835 *J.Gen.Virol.* 28(3), 341-353.

836 Hor, J.L., Heath, W.R., and Mueller, S.N. (2017). Neutrophils are dispensable in the  
837 modulation of T cell immunity against cutaneous HSV-1 infection. *Sci Rep* 7, 41091.  
838 doi: 10.1038/srep41091.

839 Huang, L., and Appleton, J.A. (2016). Eosinophils in Helminth Infection: Defenders and  
840 Dupes. *Trends Parasitol* 32(10), 798-807. doi: 10.1016/j.pt.2016.05.004.

841 Iyer, A.V., Pahar, B., Chouljenko, V.N., Walker, J.D., Stanfield, B., and Kousoulas, K.G.  
842 (2013). Single dose of glycoprotein K (gK)-deleted HSV-1 live-attenuated virus  
843 protects mice against lethal vaginal challenge with HSV-1 and HSV-2 and induces  
844 lasting T cell memory immune responses. *Virol J* 10, 317. doi: 10.1186/1743-422X-  
845 10-317.

846 Johnston, C., Gottlieb, S.L., and Wald, A. (2016). Status of vaccine research and  
847 development of vaccines for herpes simplex virus. *Vaccine* 34(26), 2948-2952. doi:  
848 10.1016/j.vaccine.2015.12.076.

849 Kaswin, G., Rousseau, A., M'Garrech, M., Barreau, E., Pogorzalek, N., De Monchy, I., et al.  
850 (2013). Optical aberrations in patients with recurrent herpes simplex keratitis and  
851 apparently normal vision. *Br J Ophthalmol* 97(9), 1113-1117. doi:  
852 10.1136/bjophthalmol-2012-302294.

853 Katsumoto, A., Lu, H., Miranda, A.S., and Ransohoff, R.M. (2014). Ontogeny and functions  
854 of central nervous system macrophages. *J Immunol* 193(6), 2615-2621. doi:  
855 10.4049/jimmunol.1400716.

856 Kaye, S., and Choudhary, A. (2006). Herpes simplex keratitis. *Prog Retin Eye Res* 25(4),  
857 355-380. doi: 10.1016/j.preteyeres.2006.05.001.

858 Kim, M., Truong, N.R., James, V., Bosnjak, L., Sandgren, K.J., Harman, A.N., et al. (2015).  
859 Relay of herpes simplex virus between Langerhans cells and dermal dendritic cells in  
860 human skin. *PLoS Pathog* 11(4), e1004812. doi: 10.1371/journal.ppat.1004812.

861 Knickelbein, J.E., Divito, S., and Hendricks, R.L. (2007). Modulation of CD8+ CTL effector  
862 function by fibroblasts derived from the immunoprivileged cornea. *Invest Ophthalmol*  
863 *Vis Sci* 48(5), 2194-2202. doi: 10.1167/iovs.06-1321.

864 Labetoulle, M., Auquier, P., Conrad, H., Crochard, A., Daniloski, M., Bouee, S., et al. (2005).  
865 Incidence of herpes simplex virus keratitis in France. *Ophthalmology* 112(5), 888-895.  
866 doi: 10.1016/j.ophtha.2004.11.052.

867 Labetoulle, M., Kucera, P., Ugolini, G., Lafay, F., Frau, E., Offret, H., et al. (2000a). Neuronal  
868 pathways for the propagation of herpes simplex virus type 1 from one retina to the  
869 other in a murine model. *J Gen Virol* 81(Pt 5), 1201-1210.

870 Labetoulle, M., Kucera, P., Ugolini, G., Lafay, F., Frau, E., Offret, H., et al. (2000b). Neuronal  
871 propagation of HSV1 from the oral mucosa to the eye. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*  
872 41(9), 2600-2606.

873 Labetoulle, M., Kucera, P., Ugolini, G., Lafay, F., Frau, E., Offret, H., et al. (2000c). Neuronal  
874 propagation of HSV1 from the oral mucosa to the eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci*  
875 41(9), 2600-2606.

876 Labetoulle, M., Maillet, S., Efstathiou, S., Dezelee, S., Frau, E., and Lafay, F. (2003). HSV1  
877 latency sites after inoculation in the lip: assessment of their localization and  
878 connections to the eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44(1), 217-225.

879 Lee, D.H., and Ghiasi, H. (2017). Roles of M1 and M2 Macrophages in Herpes Simplex Virus  
880 1 Infectivity. *J Virol* 91(15). doi: 10.1128/jvi.00578-17.

881 Lee, D.H., Jaggi, U., and Ghiasi, H. (2019). CCR2+ migratory macrophages with M1 status  
882 are the early-responders in the cornea of HSV-1 infected mice. *PLoS One* 14(4),  
883 e0215727. doi: 10.1371/journal.pone.0215727.

884 Lee, H.K., Zamora, M., Linehan, M.M., Iijima, N., Gonzalez, D., Haberman, A., et al. (2009).  
885 Differential roles of migratory and resident DCs in T cell priming after mucosal or skin  
886 HSV-1 infection. *J Exp Med* 206(2), 359-370. doi: 10.1084/jem.20080601.

887 Legroux, L., Pittet, C.L., Beauseigle, D., Deblois, G., Prat, A., and Arbour, N. (2015). An  
888 optimized method to process mouse CNS to simultaneously analyze neural cells and  
889 leukocytes by flow cytometry. *J Neurosci Methods* 247, 23-31. doi:  
890 10.1016/j.jneumeth.2015.03.021.

891 Levin, C., Perrin, H., and Combadiere, B. (2015). Tailored immunity by skin antigen-  
892 presenting cells. *Hum Vaccin Immunother* 11(1), 27-36. doi: 10.4161/hv.34299.

893 Liesegang, T.J. (1989). Epidemiology of ocular herpes simplex. Natural history in Rochester,  
894 Minn, 1950 through 1982. *Arch Ophthalmol* 107(8), 1160-1165.

895 Lucinda, N., Figueiredo, M.M., Pessoa, N.L., Santos, B.S., Lima, G.K., Freitas, A.M., et al.  
896 (2017). Dendritic cells, macrophages, NK and CD8(+) T lymphocytes play pivotal  
897 roles in controlling HSV-1 in the trigeminal ganglia by producing IL1-beta, iNOS and  
898 granzyme B. *Virol J* 14(1), 37. doi: 10.1186/s12985-017-0692-x.

899 M'Garrech, M., Rousseau, A., Kaswin, G., Sauer, A., Barreau, E., Bourcier, T., et al. (2013).  
900 Impairment of lacrimal secretion in the unaffected fellow eye of patients with recurrent  
901 unilateral herpetic keratitis. *Ophthalmology* 120(10), 1959-1967. doi:  
902 10.1016/j.ophtha.2013.02.037

903 S0161-6420(13)00215-7 [pii].

904 Maillet, S., Naas, T., Crepin, S., Roque-Afonso, A.M., Lafay, F., Efstathiou, S., et al. (2006).  
905 Herpes simplex virus type 1 latently infected neurons differentially express latency-  
906 associated and ICP0 transcripts. *J Virol* 80(18), 9310-9321. doi: 10.1128/JVI.02615-  
907 05.

908 Maroui, M.A., Calle, A., Cohen, C., Streichenberger, N., Texier, P., Takissian, J., et al.  
909 (2016). Latency Entry of Herpes Simplex Virus 1 Is Determined by the Interaction of  
910 Its Genome with the Nuclear Environment. *PLoS Pathog* 12(9), e1005834. doi:  
911 10.1371/journal.ppat.1005834.

912 Marques, C.P., Hu, S., Sheng, W., and Lokensgard, J.R. (2006). Microglial cells initiate  
913 vigorous yet non-protective immune responses during HSV-1 brain infection. *Virus*  
914 *Res* 121(1), 1-10. doi: 10.1016/j.virusres.2006.03.009.

915 Megjugorac, N.J., Young, H.A., Amrute, S.B., Olshalsky, S.L., and Fitzgerald-Bocarsly, P.  
916 (2004). Virally stimulated plasmacytoid dendritic cells produce chemokines and  
917 induce migration of T and NK cells. *J Leukoc Biol* 75(3), 504-514. doi:  
918 10.1189/jlb.0603291.

919 Melchjorsen, J. (2012). Sensing herpes: more than toll. *Rev Med Virol* 22(2), 106-121. doi:  
920 10.1002/rmv.716.

921 Menasria, R., Canivet, C., Piret, J., and Boivin, G. (2015). Infiltration Pattern of Blood  
922 Monocytes into the Central Nervous System during Experimental Herpes Simplex  
923 Virus Encephalitis. *PLoS One* 10(12), e0145773. doi: 10.1371/journal.pone.0145773.

924 Molesworth-Kenyon, S.J., Milam, A., Rockette, A., Troupe, A., Oakes, J.E., and Lausch, R.N.  
925 (2015). Expression, Inducers and Cellular Sources of the Chemokine MIG (CXCL 9),  
926 During Primary Herpes Simplex Virus Type-1 Infection of the Cornea. *Curr Eye Res*  
927 40(8), 800-808. doi: 10.3109/02713683.2014.957779.

928 Molesworth-Kenyon, S.J., Popham, N., Milam, A., Oakes, J.E., and Lausch, R.N. (2012).  
929 Resident Corneal Cells Communicate with Neutrophils Leading to the Production of  
930 IP-10 during the Primary Inflammatory Response to HSV-1 Infection. *Int J Inflam*  
931 2012, 810359. doi: 10.1155/2012/810359.

932 Motani, H., Sakurada, K., Ikegaya, H., Akutsu, T., Hayakawa, M., Sato, Y., et al. (2006).  
933 Detection of herpes simplex virus type 1 DNA in bilateral human trigeminal ganglia  
934 and optic nerves by polymerase chain reaction. *J Med Virol* 78(12), 1584-1587. doi:  
935 10.1002/jmv.20742.

936 Ong, P.Y., and Leung, D.Y. (2016). Bacterial and Viral Infections in Atopic Dermatitis: a  
937 Comprehensive Review. *Clin Rev Allergy Immunol* 51(3), 329-337. doi:  
938 10.1007/s12016-016-8548-5.

939 Poccardi, N., Rousseau, A., Haigh, O., Takissian, J., Deback, C., Trouillaud, L., et al. (2019).  
940 The kinetics of primary herpetic infection in ipsilateral and contralateral TGs  
941 determine the nature of HSV-1 acute infection and reactivation. *submitted*.

942 RDC, T. (2011). "R: A Language and Environment for Statistical Computing". Austria: R Foundation for  
943 Statistical Computing).

944 Reynaud, C., Rousseau, A., Kaswin, G., M'Garrech, M., Barreau, E., and Labetoulle, M.  
945 (2017). Persistent Impairment of Quality of Life in Patients with Herpes Simplex  
946 Keratitis. *Ophthalmology* 124(2), 160-169. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.10.001.

947 Rezende, R.A., Bisol, T., Hammersmith, K., Rapuano, C.J., Lima, A.L., Webster, G.F., et al.  
948 (2006). Efficacy of oral antiviral prophylaxis in preventing ocular herpes simplex virus  
949 recurrences in patients with and without self-reported atopy. *Am J Ophthalmol* 142(4),  
950 563-567. doi: 10.1016/j.ajo.2006.05.025.

951 Richter, E.R., Dias, J.K., Gilbert, J.E., 2nd, and Atherton, S.S. (2009). Distribution of herpes  
952 simplex virus type 1 and varicella zoster virus in ganglia of the human head and neck.  
953 *J Infect Dis* 200(12), 1901-1906. doi: 10.1086/648474.

954 Rosato, P.C., and Leib, D.A. (2015). Neurons versus herpes simplex virus: the innate  
955 immune interactions that contribute to a host-pathogen standoff. *Future Virol* 10(6),  
956 699-714. doi: 10.2217/fvl.15.45.

957 Rousseau, A., Boutolleau, D., Titier, K., Bourcier, T., Chiquet, C., Weber, M., et al. (2017).  
958 Recurrent herpetic keratitis despite antiviral prophylaxis: A virological and  
959 pharmacological study. *Antiviral Res* 146, 205-212. doi:  
960 10.1016/j.antiviral.2017.09.013.

961 Royer, D.J., Gurung, H.R., Jinkins, J.K., Geltz, J.J., Wu, J.L., Halford, W.P., et al. (2016). A  
962 Highly Efficacious Herpes Simplex Virus 1 Vaccine Blocks Viral Pathogenesis and  
963 Prevents Corneal Immunopathology via Humoral Immunity. *J Virol* 90(11), 5514-  
964 5529. doi: 10.1128/jvi.00517-16.

965 Segura, E., and Amigorena, S. (2013). Inflammatory dendritic cells in mice and humans.  
966 *Trends Immunol* 34(9), 440-445. doi: 10.1016/j.it.2013.06.001.

967 Shen, F.H., Wang, S.W., Yeh, T.M., Tung, Y.Y., Hsu, S.M., and Chen, S.H. (2013). Absence  
968 of CXCL10 aggravates herpes stromal keratitis with reduced primary neutrophil influx  
969 in mice. *J Virol* 87(15), 8502-8510. doi: 10.1128/jvi.01198-13.

970 Smith, G.A., Gross, S.P., and Enquist, L.W. (2001). Herpesviruses use bidirectional fast-  
971 axonal transport to spread in sensory neurons. *Proc Natl Acad Sci U S A* 98(6), 3466-  
972 3470. doi: 10.1073/pnas.061029798.

973 Soby, S., Laursen, R.R., Ostergaard, L., and Melchjorsen, J. (2012). HSV-1-induced  
974 chemokine expression via IFI16-dependent and IFI16-independent pathways in  
975 human monocyte-derived macrophages. *Herpesviridae* 3(1), 6. doi: 10.1186/2042-  
976 4280-3-6.

977 Sokol, C.L., and Luster, A.D. (2015). The chemokine system in innate immunity. *Cold Spring*  
978 *Harb Perspect Biol* 7(5). doi: 10.1101/cshperspect.a016303.

- 979 Takashima, A., and Yao, Y. (2015). Neutrophil plasticity: acquisition of phenotype and  
980 functionality of antigen-presenting cell. *J Leukoc Biol* 98(4), 489-496. doi:  
981 10.1189/jlb.1MR1014-502R.
- 982 Taylor, A.W., and Ng, T.F. (2018). Negative regulators that mediate ocular immune privilege.  
983 *J Leukoc Biol*. doi: 10.1002/jlb.3mir0817-337r.
- 984 Tumpey, T.M., Cheng, H., Yan, X.T., Oakes, J.E., and Lausch, R.N. (1998). Chemokine  
985 synthesis in the HSV-1-infected cornea and its suppression by interleukin-10. *J*  
986 *Leukoc Biol* 63(4), 486-492. doi: 10.1002/jlb.63.4.486.
- 987 van Lint, A., Ayers, M., Brooks, A.G., Coles, R.M., Heath, W.R., and Carbone, F.R. (2004).  
988 Herpes simplex virus-specific CD8+ T cells can clear established lytic infections from  
989 skin and nerves and can partially limit the early spread of virus after cutaneous  
990 inoculation. *J Immunol* 172(1), 392-397. doi: 10.4049/jimmunol.172.1.392.
- 991 van Velzen, M., Jing, L., Osterhaus, A.D., Sette, A., Koelle, D.M., and Verjans, G.M. (2013a).  
992 Local CD4 and CD8 T-cell reactivity to HSV-1 antigens documents broad viral protein  
993 expression and immune competence in latently infected human trigeminal ganglia.  
994 *PLoS Pathog* 9(8), e1003547. doi: 10.1371/journal.ppat.1003547.
- 995 van Velzen, M., Laman, J.D., Kleinjan, A., Poot, A., Osterhaus, A.D., and Verjans, G.M.  
996 (2009). Neuron-interacting satellite glial cells in human trigeminal ganglia have an  
997 APC phenotype. *J Immunol* 183(4), 2456-2461. doi: 10.4049/jimmunol.0900890.
- 998 van Velzen, M., van de Vijver, D.A., van Loenen, F.B., Osterhaus, A.D., Remeijer, L., and  
999 Verjans, G.M. (2013b). Acyclovir prophylaxis predisposes to antiviral-resistant  
1000 recurrent herpetic keratitis. *J Infect Dis* 208(9), 1359-1365. doi: 10.1093/infdis/jit350.
- 1001 Vogel, K., Thomann, S., Vogel, B., Schuster, P., and Schmidt, B. (2014). Both plasmacytoid  
1002 dendritic cells and monocytes stimulate natural killer cells early during human herpes  
1003 simplex virus type 1 infections. *Immunology* 143(4), 588-600. doi:  
1004 10.1111/imm.12337.
- 1005 Weller, P.F., and Spencer, L.A. (2017). Functions of tissue-resident eosinophils. *Nat Rev*  
1006 *Immunol* 17(12), 746-760. doi: 10.1038/nri.2017.95.
- 1007 Whitney, P.G., Makhlof, C., MacLeod, B., Ma, J.Z., Gressier, E., Greyer, M., et al. (2018).  
1008 Effective Priming of Herpes Simplex Virus-Specific CD8(+) T Cells In Vivo Does Not  
1009 Require Infected Dendritic Cells. *J Virol* 92(3). doi: 10.1128/jvi.01508-17.
- 1010 Wilhelmus, K.R., Beck, R.W., Moke, P.S., Dawson, C.R., Barron, B.A., Jones, D.B., et al.  
1011 (1998). Acyclovir for the prevention of recurrent herpes simplex virus eye disease.  
1012 Herpetic Eye Disease Study Group. *N Engl J Med* 339(5), 300-306. doi:  
1013 10.1056/nejm199807303390503.
- 1014 Wojtasiak, M., Pickett, D.L., Tate, M.D., Londrigan, S.L., Bedoui, S., Brooks, A.G., et al.  
1015 (2010). Depletion of Gr-1+, but not Ly6G+, immune cells exacerbates virus replication  
1016 and disease in an intranasal model of herpes simplex virus type 1 infection. *J Gen*  
1017 *Virol* 91(Pt 9), 2158-2166. doi: 10.1099/vir.0.021915-0.
- 1018 Xu, H., Manivannan, A., Dawson, R., Crane, I.J., Mack, M., Sharp, P., et al. (2005).  
1019 Differentiation to the CCR2+ inflammatory phenotype in vivo is a constitutive, time-  
1020 limited property of blood monocytes and is independent of local inflammatory  
1021 mediators. *J Immunol* 175(10), 6915-6923. doi: 10.4049/jimmunol.175.10.6915.
- 1022 Young, R.C., Hodge, D.O., Liesegang, T.J., and Baratz, K.H. (2010). Incidence, recurrence,  
1023 and outcomes of herpes simplex virus eye disease in Olmsted County, Minnesota,  
1024 1976-2007: the effect of oral antiviral prophylaxis. *Arch Ophthalmol* 128(9), 1178-  
1025 1183. doi: 10.1001/archophthalmol.2010.187.
- 1026 Yu, Y.R., O'Koren, E.G., Hotten, D.F., Kan, M.J., Kopin, D., Nelson, E.R., et al. (2016). A  
1027 Protocol for the Comprehensive Flow Cytometric Analysis of Immune Cells in Normal  
1028 and Inflamed Murine Non-Lymphoid Tissues. *PLoS One* 11(3), e0150606. doi:  
1029 10.1371/journal.pone.0150606.

1030

**Titre :** Cinétique des effecteurs immunologiques impliqués dans la protection contre le virus HSV-1 après primo-infection par une autre souche non neurovirulente : vers un modèle vaccinal.

**Mots clés :** HSV-1, Immunité, protection, infiltrat immunitaire, chémokines

**Résumé :** Chez l'homme, la primo-infection par le virus Herpès simplex de type 1 (HSV-1) a lieu au niveau de la muqueuse oro-pharyngée. Après une phase de réplication, les virions pénètrent les terminaisons axonales et migrent vers le ganglion trijumeau ipsilatéral (TG), puis vers le TG controlatéral. Le virus entre alors dans un état de latence dans les 2 TG. Les réactivations d'HSV-1 dans ces neurones sont responsables des kératites herpétiques (KH), unilatérales et survenant toujours du même côté chez un patient donné.

En utilisant un modèle murin oro-oculaire, qui reproduit les aspects essentiels de la maladie chez l'homme, nous avons précédemment démontré que l'inoculation virale latéralisée d'un côté de la bouche entraîne une réplication virale dans la lèvre, suivie d'une KH ipsilatérale à l'inoculation 6 jours plus tard. De manière concomitante, le virus se propage aux 2 TG, mais les réactivations ne surviennent que du côté ipsilatéral à l'inoculation. Nous avons également observé qu'après une primo-infection dans une lèvre avec une souche d'HSV-1 non-neurovirulente, les souris étaient protégées contre les signes de la maladie et contre la réactivation d'une souche sauvage pleinement virulente inoculée secondairement dans l'autre lèvre (souche ré-infectante). Afin de comprendre les mécanismes immunitaires en jeu dans cet état de protection, nous avons combiné une analyse en cytométrie en flux multiparamétrique à des tests immunologiques, pour quantifier et définir l'infiltrat immunitaire hématopoïétique et les chémokines inflammatoires au site d'inoculation et dans les TG. Nous avons démontré qu'après une inoculation unique avec la souche sauvage virulente, un infiltrat immun riche en cellules pro-inflammatoires, survenait de manière retardée dans les lèvres inoculées, et persistait dans les TG. A l'opposé, l'infiltrat immunitaire était plus précoce dans les tissus réinfectés (après une primo-infection par la souche non neurovirulente), plus riche en cellules de l'immunité adaptative, et associé à des concentrations moindres de chémokines inflammatoires. En outre, cet infiltrat s'estompait plus rapidement, avec une disparition concomitante des chémokines inflammatoires. Ces données permettent de mieux comprendre la nature et la cinétique de la réponse immunitaire anti-HSV-1, et pourront être utiles pour le développement futur de stratégies vaccinales anti-HSV-1.

**Title:** Kinetics of immune effectors involved in protection against HSV-1 after a primary infection by a non-virulent strain: toward a vaccinal model.

**Keywords:** HSV-1, immunity, protection, immune infiltrate, chemokines

**Summary:** In humans, Herpes simplex virus type 1 (HSV-1), primary infection occurs in the oral mucocutaneous tissues. Virions replicated here penetrate sensitive neuronal axons, migrate to both trigeminal ganglion (TG) where it established a lifelong latency. Reactivations of HSV-1 in the TG neurons induce clinical recurrences in the connected peripheral tissues. This process is involved in herpes simplex keratitis (HSK), a condition that, strikingly, occurs almost exclusively in the same eye for a given patient. Based on an experimental oro-ocular (OO) model of HSV-1 infection, that recapitulates most of these human clinical features, we previously demonstrated that a virus inoculation on one side of the mouth, leads to viral replication in the lip, followed by HSK. Virus concomitantly disseminates to both TG, but reactivation only occurs in the TG ipsilateral to the inoculation site. We also observed that after a primary inoculation with a non-neurovirulent strain of HSV-1 in one lip, mice are protected against both acute phase disease and reactivation after a superinfection with a fully virulent wild-type strain of HSV-1 in the contralateral lip.

In order to understand the underlying mechanisms involved in this state of protection, we combined high resolution flow cytometry and bead-based immunoassays, to quantify hematopoietic subsets and inflammatory chemokines in the site of inoculation and in the TG. We demonstrated that after a single inoculation with the wild-type strain, a delayed immune infiltrate, boasting more proinflammatory subsets, occurred in the lip and persisted in the TG. In contrast, the immune infiltrate occurred earlier in the superinfected lip and ipsilateral TG, with less inflammatory chemokines but more adaptive immune subsets. Moreover, cellular infiltrate resolved faster, correlating with nullification of inflammatory chemokines locally. These data show that immune response kinetics influence the development of natural immunity to HSV-1, and can be harnessed to protect against disease and reactivations.