

Cátedra Adif - UPM



Seminario técnico

Desafíos del ferrocarril frente al cambio climático

ETSICCP. Madrid, 24 de enero de 2024



Panorama general sobre el cambio climático en el ferrocarril

Pierre-Etienne GAUTIER, CentraleSupélec

Frédéric DUROT, SNCF Réseau

Michel TRIQUET, SNCF Réseau

Vincent TALFUMIERE, SNCF Réseau

El cambio climático ya ha provocado fenómenos extremos

Sin embargo:

- Lecciones aprendidas y medidas adoptadas
- Cómo anticipar la revisión de los códigos de prácticas/normas

Panorama general de los riesgos asociados al cambio climático:

- Inundaciones en vías , puentes , desmontes...
- Olas de calor o sequía (pilotes de puentes)
- Terraplén y desmontes
- Calor: pandeo del carril
- Fuertes vientos
- Fuego

Inundación repentina + Escorrentía

- Fuente: <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/impacts/inondation>
- **Aumento repentino de los caudales al nivel de las cimentaciones sumergidas (FSA, Foundation in Aquatic Site por sus siglas en inglés).** Estas inundaciones incrementan significativamente el riesgo de socavación al pie de cimiento.
- **Ejemplo: río Roya:** 30/35 millones de euros para el conjunto de las obras bajo la dirección de SNCF, de los cuales 10/15 millones de euros se destinaron al muro porticado de Fontan



Inundaciones: Posibles obstáculos

- **Acciones en curso:**
- Identificación de estructuras en riesgo gracias a la norma vigente de inspección (IN 1253)
- Mejora del conocimiento sobre las estructuras con cimentación sumergida (SAF y muro en SAF)
- Mantenimiento preventivo de las SAF desde 1980
- **Proyecto en fase de definición**
- Establecer hipótesis hidráulicas en relación al cambio climático (CC) a nivel nacional, en colaboración con la DREAL (Dirección regional de medio ambiente, planeamiento y vivienda), el Estado y los expertos en Hidráulica de la SNCF
- Estructuras nuevas o restauradas: aplicación de la Ley de Aguas con hipótesis de CC que se calibrarán conjuntamente con los responsables sobre caudal, NPHE, obstrucciones de hielo, etc.
- Estructuras antiguas: priorizar por cuencas hidrográficas las zonas de mayor riesgo, cálculos basados en hipótesis por definir (coeficiente de seguridad exigido por la DDT: de 1,3 a 1,8 en Aquitania, pero no unificado en Francia). A partir de ahí, decidir las obras que hay que anticipar sin esperar problemas futuros (refuerzo, transparencia hidráulica, restauración, etc.)...
- Otro riesgo: **Colmatación de estructuras por deslizamiento de tierra**



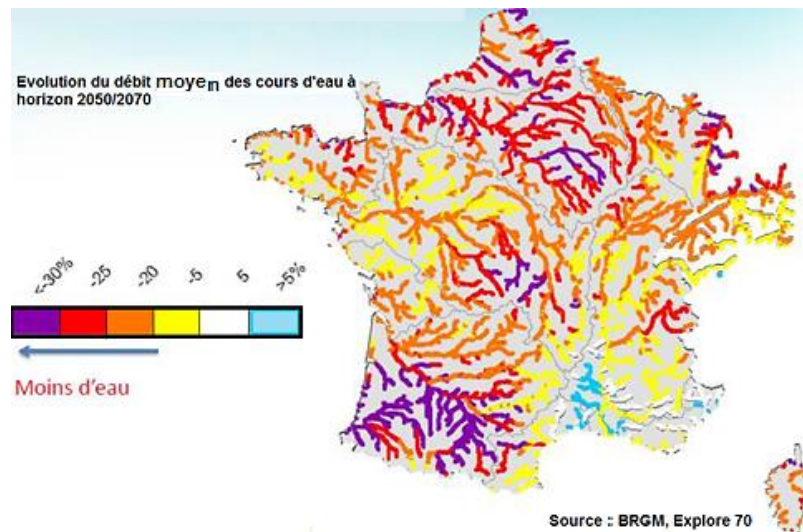
Disminución del estiaje

- Disminución del estiaje en la mayoría de las cuencas hidrográficas.
- Los cimientos de las estructuras con pilotes de madera podrían empezar a pudrirse (7000 puentes ferroviarios).

Acciones en curso:

Las estructuras con cimentación con pilotes son objeto de un seguimiento especial (IN 1253): seguimiento topográfico de precisión para detectar signos de deterioro. Esto nos permite afinar nuestros análisis de riesgos.

Mejora del conocimiento de las estructuras basadas en pilotes de madera y su comportamiento (proyecto de innovación sobre la pudrición de la madera en un entorno húmedo con la Universidad Gustave Eiffel).



Terraplenes y desmontes

- **Riesgo de rocas (RNT 5 - desprendimientos** de rocas): poco sensible al cambio climático
- **Riesgo bajo (RNT18 - deslizamientos de desmontes y terraplenes - asientos):**
- Desprendimientos en desmontes y terraplenes: sensibles **al cambio climático**, pero no directamente debido a fenómenos hidrogeológicos (saturación del suelo y alta dependencia con la sensibilidad de los suelos al agua).
- Asientos en terraplenes: fenómeno de **contracción/expansión de las arcillas** con mayor impacto en la regularidad que en la seguridad: se está realizando un estudio en 2 tramos de líneas de la DZPSE para calificar y cuantificar este impacto, sabiendo que muchos límites de velocidad en las vías se asignan arbitrariamente.
- **El riesgo de deshielo (RNT19 - Colapso de cavidades):** sensible al cambio climático e **indirectamente con la saturación del suelo** y la **subida del nivel en el acuífero** tras semanas de lluvia.
- El riesgo **hidráulico (RNT7: inundaciones - deslizamientos, erosión, crecidas):** estrechamente vinculado al cambio climático.

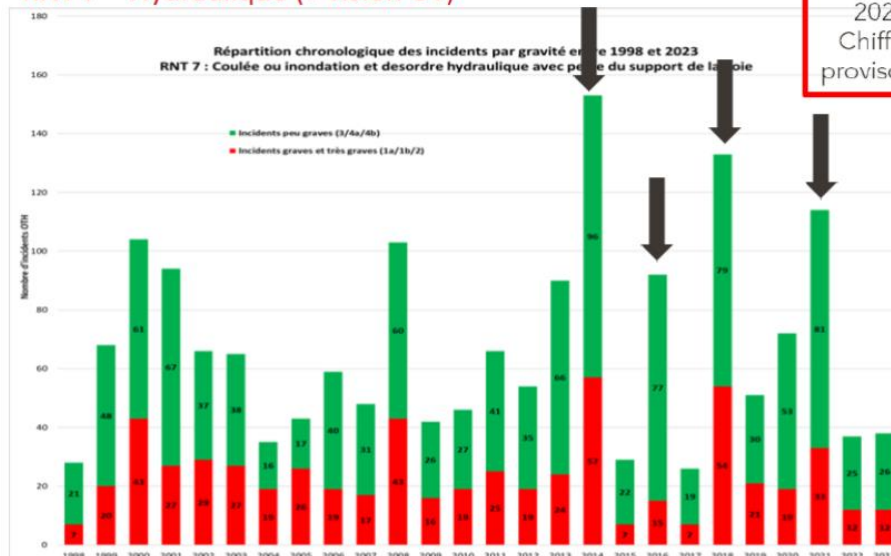
Riesgo hidráulico : Lecciones aprendidas

Riesgo hidráulico (RNT7: inundaciones, corrimientos de tierras, erosión, inundaciones): estrechamente vinculado al cambio climático.

- Desde 2014, se han **sucedido años secos y húmedos durante los últimos 10 años con fenómenos extremos como:**
- **Lluvias torrenciales** en la Isla de Francia y el Centro en **2016** (crecida del Sena en junio).
- **Frecuentes tormentas intensas en 2018** en todo el país.
- Las lluvias de Cévennes, que provocaron el cierre del eje NIMES - España) en **2019** en Villeneuve les B ziers y **2022** en Lunel y fuera de este eje en **2023** al norte de B darieux.
- Las **lluvias excepcionales de 2023** en Saboya y en los **Hauts de France** con cierre de la línea Tarentaise y de las líneas alrededor de Boulogne-sur-Mer en noviembre.
- Y por supuesto, la tormenta **ALEX en 2020**, con la inundación catastrófica del río Roya

Incidentologie

RNT 7 – Hydraulique (+ vision OT)



Nombre d'incidents dans le domaine hydraulique, très hétérogènes d'une année sur l'autre : L'année 2023 est très faible avec une période de sécheresse longue cet été a caractérisé le climat de l'année. Les incidents de novembre sur ALPES et NPC ne sont pas tous intégrés.

Cette répartition est symptomatique du changement climatique

Terraplenes y desmontes : medidas adoptadas

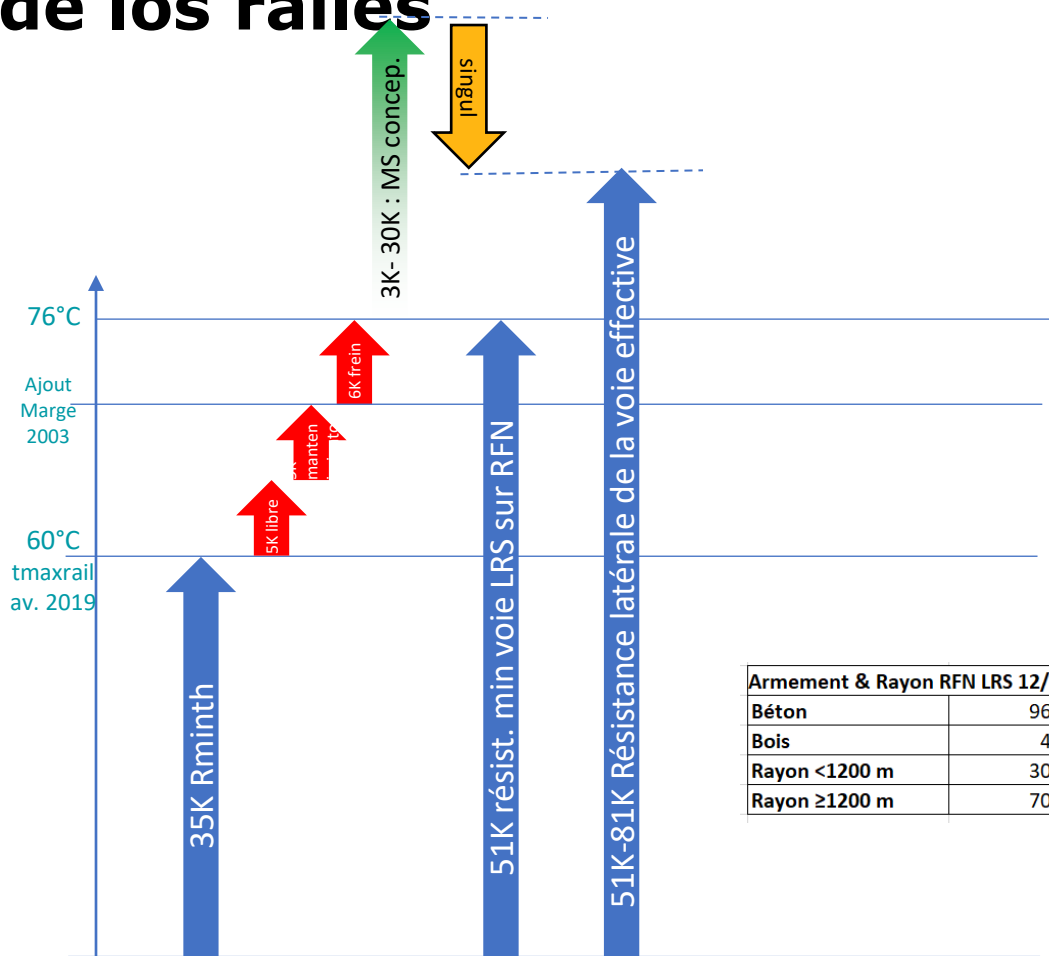
- **Acciones de seguimiento y mantenimiento:**
- Proyecto TOUTATIS: mejora de las **rondas meteorológicas**: alertas en función de un umbral de precipitaciones.
- Elaboración de un plan de mantenimiento del sistema de drenaje
- Instalación de sensores de nivel de agua en lugares críticos
- **Acciones sobre el conocimiento de los activos:**
- Inventario de activos hidráulicos
- Creación de una base de datos hidráulicos
- Estudio de la peligrosidad hidráulica en tramos de línea
- Análisis del cambio de uso del suelo
- **Acciones sobre el tratamiento:**
- Proyecto GRRIP: creación de franjas de hierba y setos en la cresta excavada en cooperación con los residentes locales
- En casos muy concretos, transparencia de ciertas estructuras que servían de barrera a las aguas de escorrentía (un sitio en LR y un tramo entre Tarascon y Arles)



Evolución de las normas de diseño y mantenimiento: ejemplo del riesgo de pandeo de los raíles

• Principios de diseño

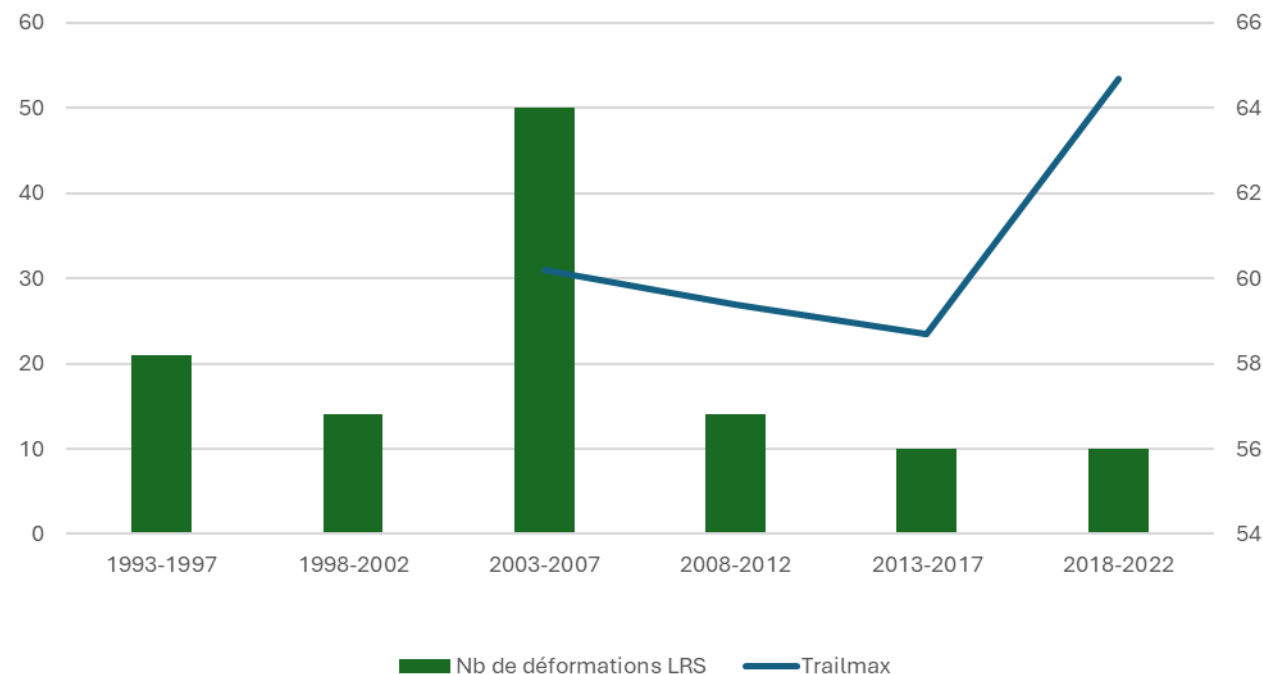
- **60 C Tm x registrada** en el RFN antes de 2019
- 25 C temperatura de liberación deseada "tlr" (en la gran mayoría de los casos)
- Resistencia mínima teórica = 35K.
- Además, añadimos
- +5K Margen de seguridad (SM) para la liberación
- +5K SM para mantenimiento
- +6K SM para frenado, añadido después de 2003 y detallado en la página siguiente
- Estos tres SM se combinan estadísticamente para garantizar que la RFN **resista** sistemáticamente una **diferencia de temperatura de al menos 51K para un rail liberado**.
- Existe un cuarto margen, **en la medida en que la mayor parte del lineal de la RFN se sitúa en condiciones favorables de armado y curvatura** (es un margen que varía localmente), afecta al 98% del lineal y representa un SM adicional entre +3K y +30K. El 2% restante corresponde en gran parte a un **"Perímetro Frágil"** **constituido por líneas muy antiguas, identificadas en 2020**
- La reducción del margen debida a singularidades (OA, final de túnel, AdV,...) nunca reduce la resistencia total por debajo de 51K
- Identificación de **zonas excedentes** (diseño) y **zonas sensibles** (SZ) para el mantenimiento



Evolución de las normas de diseño y mantenimiento : ejemplo del riesgo de pandeo ferroviario / resultados de la evolución de los márgenes de seguridad posteriores a 2003 en cwr

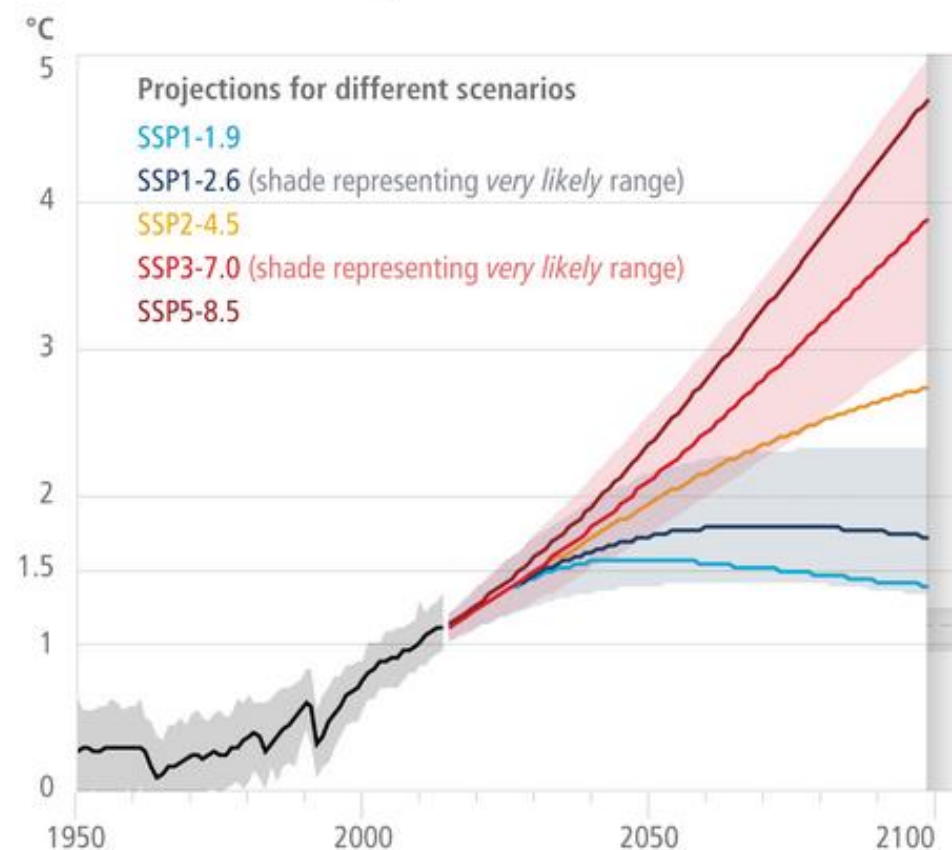
- Los nuevos criterios de diseño posteriores a 2003, que inducen el aumento del SM mínimo de +10 a +16 K, **redujeron el número de deformaciones CWR / S&C**, mientras que:
- **La temperatura máxima del carril aumentó (el límite de 60 C se supera en 2019 - 64,7 C y 2022 - 64,1 C).**
- La longitud de CWR aumenta cada año: 40500 km de vía en 2021 frente a 34600 en 2009.
- En la situación actual, el número de deformaciones en la RFN es muy bajo en comparación con las redes extranjeras. Entre los países que publican datos sobre el tema:
- Suiza: 30 deformaciones en 2021 para una red 6 veces más corta (~5500 km de líneas)
- Suecia: 200 deformaciones en 2018 para una red 3 veces más corta (~9500 km de líneas)
- Las deformaciones residuales de la RFN en los últimos años se **deben casi en su totalidad a un problema de mantenimiento mal realizado**. Además, salvo raras excepciones (3 desde 2018), su amplitud es limitada (<100 mm)

D formations LRS / Tmax rail



Escenarios del IPCC y consecuencias para las vías

- Los escenarios del IPCC **no especifican las temperaturas máximas anuales previstas** para cada uno de los escenarios, ni siquiera los aumentos medios de temperatura en Francia para cada uno de los escenarios
- Sin embargo, el aumento de las temperaturas sólo tendrá un impacto en la parte de la vía de la RFN **para las temperaturas muy altas (>42 C del aire)**. El aumento de la temperatura media no tiene ningún efecto sobre la resistencia de la vía.
- Para estudiar la resiliencia de red ferroviaria ante los aumentos de temperatura, se supone que el aumento de +1,1 C con respecto a la era preindustrial a nivel mundial ha aumentado las temperaturas máximas de las vías de 60 C a 65 C.
- En estas condiciones, por **aproximación lineal, para el año 2100, la tm x ferroviaria prevista sería:**
- **SSP1-1,9: +1,5 C 67 C carril**
- **SSP2-4,5: +2,8 C 73 C carril**
- **SSP5-8,5: +4,7 C 82 C carril**



Escenarios del IPCC y consecuencias para las vías

• ESCENARIO SSP 1-1,9

- En este **escenario favorable**, el **pico de temperatura se alcanza hacia 2040**, con **unas** temperaturas máximas previstas en el carril de **67 C**.
- El **margen adicional de 6K posterior a 2003 se absorbe totalmente y se supera muy ligeramente**.
- La situación se aproxima a la anterior a 2003, con un número bajo de deformaciones de los CWR y muy ligeramente superior al actual después de 2040 (entre 10 y 20/5 años). Mientras que el esfuerzo de mantenimiento sigue siendo similar al actual, el número de zonas sensibles no cambia significativamente, aunque el número de rondas de vigilancia aumenta en parte debido al número de días "calurosos".

• ESCENARIO SSP 5-8,5

- En este **peor escenario**, los cambios de temperatura son muy importantes.
- se prevé que las temperaturas máximas en el carril sean de **82 C a finales de siglo**.
- **El margen adicional de 6K posterior a 2003 se superar  en torno a 2030, si no antes**.
- Más allá de 2030, el 4  margen de diseño permitirá limitar el número de deformaciones, sobre todo si el Perímetro Frágil y el resto de archivos EZR se tratan progresivamente en RGB, pero el ritmo de trabajo será insuficiente. El número de deformaciones CWR se mantiene estable y ligeramente superior al actual entre 2030 y 2040 (entre 10 y 20/5 años).
- **Ya en 2040, podríamos alcanzar el pico de deformación de 2003. Habrá que aplicar un nuevo margen de seguridad y la aplicación de una medida "tipo 2003"** con reconfiguración de las normas de diseño de los CWR. Para limitar el riesgo, puede ser necesaria la aplicación de este nuevo margen de seguridad antes de 2035, con costes asociados muy importantes.
- **Además, el esfuerzo de mantenimiento deberá aumentar considerablemente en otoño e invierno** para evitar una explosión del número de rondas de vigilancia y de límites de velocidad para los días calurosos.

Escenarios del IPCC y consecuencias para las vías

• ESCENARIO SSP 2-4,5

- En este escenario medio, la **evolución de las temperaturas es significativa pero se ralentiza a finales de siglo.**
- Se prevé que la temperatura máxima de las vías sea **de 73°C en 2100.**
- El margen adicional de **6K posterior a 2003 se supera hacia 2035.**
- **Más allá de 2035, el 4º margen de diseño limitará el número de deformaciones,** especialmente si el Perímetro Frágil y el resto de archivos de zonas excedentes se tratan gradualmente en la renovación de la vía . El número de deformaciones **del CWR se mantiene estable y ligeramente superior al actual entre 2035 y 2050 (entre 10 y 20/5 años)** y evolucionará con más fuerza si se mantiene la trayectoria de regeneración actual. Sin embargo, este número de deformaciones **se mantendrá en niveles cercanos a los observados en la década de 1990.**
- Si bien el esfuerzo de mantenimiento sigue siendo similar al actual, el número **de zonas sensibles está cambiando muy gradualmente, lo que da lugar a un número de rondas de vigilancia y limitaciones de velocidad asociadas que evoluciona cada vez más rápidamente con el tiempo.** Habrá que programar un esfuerzo de mantenimiento en otoño/invierno para limitar al máximo el número de zonas sensibles a medida que se acerquen las primeras olas de calor.
- **Escenario preferido por la SNCF:** Aunque la **resistencia de las vías está en entredicho, correspondería a un escenario sostenible** si:
 - Las renovaciones de vías se mantienen en ~1000 km/año con las mismas especificaciones asociadas a la **política de mantenimiento de vías revisada** .
 - Para garantizar el margen de diseño de 51K, se adopta **una temperatura de carril libre más alta para el CWR** (por ejemplo, 28 °C frente a 25 °C).

Fuertes vientos

- Se revisarán los **criterios de diseño de las** medidas para las infraestructuras y las **barreras contra el viento / los límites de velocidad (sistemas de alerta contra el viento)** en las líneas de alta velocidad.
- Cabe esperar reducciones de velocidad más frecuentes
- Cuestión de las líneas convencionales (lecciones que aprender de DB)

Peligro de incendio

- **Seguimiento por satélite combinado con datos históricos (Programa MINERVE)**
- Combinación de análisis de imágenes por satélite, datos históricos e inteligencia artificial para elaborar mapas de riesgo de incendios en zonas forestales.
- Comprobación cruzada con la base de datos de incidentes de la SNCF
- Categorización de las líneas en clases de riesgo de incendio (zona de prueba en Languedoc Roussillon)
- La contribución de las imágenes por satélite tiene una puntuación baja en la explicación del modelo.
- **Programa de vigilancia y control de la vegetación**
- Tema sensible con respecto al vecindario y la biodiversidad

Conclusiones , Para llevar

- **Los efectos del cambio climático podrían observarse en sucesos/incidentes durante décadas, incluso en sucesos recientes más graves**
- **Programas de vigilancia establecidos o en fase de desarrollo para diferentes riesgos**
- **Ya se han revisado los criterios de diseño para algunos riesgos (pandeo de carriles), pero será necesario revisarlos de forma más exhaustiva.**
- **Supuestos/modelos para la evaluación cuantitativa de los sistemas ferroviarios frente al aumento de la temperatura global provocada por el cambio climático**
- **Necesidad de seguir investigando:**
- Cómo aumentar la resistencia de los componentes/subsistema
- La evaluación cuantitativa global del riesgo necesita una cuantificación de la resistencia del sistema (como la sensibilidad al viento cruzado).
- Mapas de peligrosidad múltiple y evaluación de riesgos...

Gracias por su atención